
ISAAC ASIMOV EL
ELECTRON ES ZURDO
Y OTROS ENSAYOS
CIENTIFICOS
Alianza Editorial

El electrón es zurdo y otros ensayos científicos

Sección: Ciencia y Técnica
Isaac Asimov:
El electrón es zurdo
y otros ensayos científicos
El Libro de Bolsillo
Alianza Editorial Madrid
Título original: *Extracts of: The Left Hand of the Electron*
The Solar System and Back — From Earth to Heaven
Traductor: Francisco Moran Samaniego
Escaneado por: Marroba2002
Corregido por: RedRaven.

Milán, 38; TE: 2000045
ISBN: 84-206-1653-2
Depósito legal: M. 14.025-1977
Papel fabricado en Torras Hostench, S. A.
Impreso en Hijos de E. Minuesa, S. L.
Ronda de Toledo, 24 - Madrid-5
Printed in Spain

ÍNDICE

Introducción 4
1.Futuro amenazador....6
2.Tamaño justo....13
3.Contracción increíble....20
4.Pares y nones....27
5.El electrón es zurdo....33
6.Ver doble....40
7.La molécula tridimensional....47
8.La asimetría de la vida....54
9.Los talasógenos....61
10.El agua caliente....68
11.El agua fría....76
12.Certidumbre de la incertidumbre....83
13.A espaldas del maestro....90
14.La Tierra de Mu....97
15.Calidad prima 104
16.El Quinto de Euclides....111
17.La verdad plana....118
18.Morir en el laboratorio....125

Introducción

Me avergüenza un poco declarar que uno de los capítulos de esta obra, el octavo por más señas, es justamente mi ensayo mensual número 160 para *The Magazine of Fantasy and Science Fiction.* Durante más de trece años he venido escribiendo, sin falta, un ensayo al mes para esta noble revista; y vivo en constante terror de que pueda llegar un día en que oiga en tono «menos suave» la horrible frase: «¡¡¡Basta ya!!!», con tres admiraciones lo menos.

Pero ¿de quién? No ciertamente de mí mismo; porque aunque en todos esos meses he escrito también sobre otros temas de toda índole, desde históricos hasta festivos y desde novela científica hasta comentarios bíblicos, en lo que invariablemente ponía más esmero era en mi ensayo mensual para dicha revista. ¿Por qué? Pues porque... ¡Bueno!, luego os lo explicaré.

Pues entonces, ¿me vendrá la orden de callar del amable editor de la revista? Espero que nunca. Al menos él me asegura que jamás.

Pero intervienen también otros editores. Este es el tomo noveno de ensayos míos, y todos los aceptó Doubleday and Co., con placentera e infalible fidelidad, en cuanto se los entregué; y me asegura que *tampoco ellos me faltarán.*

Pero ¿y los lectores? Temo que puedan cansarse de gastar sus dineros, tan duros de ganar, en leer mis interminables charloteos entusiastas, sobre este o aquel tema, capítulo tras capítulo y tomo tras tomo; lo juzgo posible. Espero que ninguno de vosotros llegue a cansarse de mí, pero eso no es cosa que pueda yo gobernar. Quizá os canséis.

Y si tal cosa sucede, Doubleday and Co. tendrá que venir a explicarme las duras realidades de la vida comercial. Lo estoy viendo con los ojos de la mente: Junta de editores, echando a suerte quién ha de decírmelo; carraspeos de embarazo; la frase que empieza: «Amigo Isaac, la cosa es que...»

Y luego unas mesuradas razones del editor de la revista, indicando que, «para animar la venta, va a ser preciso...»

Y yo, ¿qué haré?

Pues voy a decíroslo. Si todos me abandonáis (¡ojalá no!) yo seguiré escribiendo ensayos, así y todo; uno al mes, lo menos. No podré evitarlo, porque hoy han llegado a ser mi peculiar modo de aliviar tensiones internas, alejando el riesgo de explosión.

Cuando cavilo sobre la «explosión demográfica» me veo en la alternativa de pasar la noche en vela (pues llevo años reñido con el sueño), o ponerme a escribir los ensayos «¡Alto!» y «Pero ¿cómo?»

Si un especialista en Shakespeare levanta dos exquisitos dedos a su nariz patricia, porque yo, mísero profano, osé invadir su inviolable coto, escribiendo una obra en dos tomos titulada *Guía a Shakespeare, por Asimov,* yo podría haber seguido la tradicional costumbre entre escritores, en toda la historia: cogerme un formidable berrinche y salir rugiendo a comprar látigos; o pude hacer lo que hice: escribir *Bill y yo* , desechando melancolías, y marcándome un tanto indiscutible, según mi honrado parecer.

Si al escribir uno de mis restantes libros, pongamos uno de historia de Roma, doy con una coincidencia interesante y extraña, no tengo por qué desperdiciarla. Puedo ponerme a trabajar y cimentarla firmemente en el suelo, en *Pompeyo y circunstancias* [*], arreglándomelas, de paso, para lanzar un título, que lleva uno de los más brillantes chistes inventados por mí, en una vida dedicada a inventar chistes brillantes.

---

[*] Recuérdese que Bill es diminutivo cariñoso de Guillermo.— (*Nota del Traductor.)*

[**] Parodiando «pompa y circunstancias».—(N. *del T.)*

(Una vez conté el cuento del fanfarrón, que presumía de ser el mejor esquiador acuático del mundo. Al fin, en una hermosa playa con espléndido oleaje, le pusieron el patín en las manos y le dijeron que saliese a lucirse. Marchó, playa abajo, hasta el límite mismo de las olas, y allí plantó la tabla, derecha en la arena, y se quedó inmóvil. «¡Avante! —le gritaban todos—, ¡al agua!»...

Pero él, a su vez les chilló: «¡No hay para qué! *También patina el que parado espera»)*[*] [**].

(Aquella vez salí con vida de milagro.)

O bien tropiezo con un breve artículo de una revista científica, que informa de que cierta línea de investigación parece establecer relaciones, entre la conservación de la paridad y la actividad óptica de los compuestos naturales. El artículo tenía unas quinientas palabras.

Inmediatamente me inflama el afán de explicarles eso *a mis lectores, a mi manera.* Eso significa, naturalmente, que primero tengo que definirles la paridad, y cuándo se conserva y cuándo no, lo cual me cuesta dos artículos de a mil palabras. Luego tengo que explicarles todo el lío de la actividad óptica, lo cual me cuesta otros dos artículos, los cuales combino después en un quinto; y ahí tenéis todo el mamotreto, en los cinco primeros capítulos de esta obra.

O después de una de mis charlas, un oyente me detiene y me dice: «¿Por qué no escribe usted un artículo sobre la geometría no euclidiana?» «Buena idea», contesto afablemente, y ya no sosiego hasta escribir no uno, sino dos: *El quinto de Euclides* y *La verdad plana,* para poder respirar tranquilo.

Pero el caso más célebre fue una vez que me rebelé y me grité a mí mismo: «¡Pardiez!» —porque yo gasto exclamaciones fuertes, cuando se tercia, y ésa es mi favorita—. «Hoy no voy a escribir. Por una vez voy a pasarme el día en la cama, no haciendo nada más que leer.»

¡Dicho y hecho! Cogí un libro de matemáticas, que estaba deseando leer con todo sosiego, cuando no tuviese nada que hacer; bajé todas las persianas, pues aborrezco la luz natural; encendí la lámpara, me acosté y empecé la lectura. El primer capítulo trataba de números primos; antes de terminarlo, di en pensar y pensar...

Y salté del lecho, ardiendo al rojo blanco de impaciencia, y escribí *Prima calidad, y* adiós mi día de cama.

¿Cómo voy, pues, a interrumpir mis escritos, sólo porque los lectores dejen de comprarlos y porque los editores se vean forzados, por la falta de venta, a seguirles la corriente?

Tendré que continuar escribiendo ensayos, para mí solo; ir apilándolos unos sobre otros, y de vez en cuando hojear entre ellos, leerlos y releerlos, y gozarlos todos yo mismo.

¿Cómo que «basta ya»?

Para vosotros podrá ser; pero para mí, no. ¡¡¡Nunca jamás!!!

[***] En inglés la disculpa del fanfarrón

They also surf who only stand and wait

es astracanesca parodia del verso de Milton

They also serve who only stand and wait

hermoso remate de un soneto en que el poeta ciego, después de lamentar que su invalidez le impida servir a Dios debidamente, se da cuenta de que

«También le sirve quien paciente espera»

Las únicas palabras distintas en ambos versos son serve=servir y surf=patinar en las olas, que además tienen sonidos semejantes.—(N. del T.)

1. Futuro amenazador

En resumidas cuentas, hay dos modos de enjuiciar a los autores de ficción científica.

Una consiste en tenerlos por chiflados: «¿Cómo van esos hombrecillos verdes, Isaac?» «¿Estuviste en la luna hace poco, Isaacito simpático?»

La otra manera consiste en tomarlos por sagaces escrutadores de lo futuro: «¿Cómo serán las aspiradoras del siglo XXI, doctor Asimov?» «¿Qué adelanto sustituirá a la televisión, profesor?»

De las dos yo creo que prefiero la primera. Al fin, ser chiflado es bien fácil. Yo puedo hacerlo sin preparación, en cualquier momento o lugar, desde los tés facultativos hasta los congresos de ficción científica.

Es mucho más difícil predecir lo futuro, sobre todo en los términos formulados por quienes nos preguntan, pues a ellos siempre les interesan detalles sobre artefactos, y eso es precisamente lo que yo no puedo decirles.

Comprenderéis, pues, que cuando me piden hablarle a un pacifico senado, o escribir un artículo para una revista especialmente seria, el tema que menos me gusta tratar es «Lo futuro, tal como yo lo veo».

Comprenderéis también que el tema que casi siempre me piden que trate es... bueno, habéis acertado.

Por eso me niego; al menos intento negarme. Desgraciadamente, aunque en mis convicciones soy firme y escrupuloso, presto a morir mucho antes de comprometer mis principios, tengo un punto débil: soy una pizca asequible a la adulación.

Por eso, cuando el *New York Times* me llamó poco después de abrirse la Feria Mundial de Nueva York, invitándome a visitarla a expensas de ellos y a escribirles un artículo sobre cómo será el mundo dentro de unos cincuenta años, yo vacilé primero, después acepté.

Después de todo yo pensaba visitar la feria sin falta, y esperaba pasarlo allá de primera (y así fue), y además me halagaba la invitación del *Times,* etc.

Pues bien, escribí el artículo y apareció el 16 de agosto de 1964, en *Sunday Times Magazine Section* (por si acaso, amables lectores, queréis irrumpir como locos en la biblioteca, para leerlo).

Pero pronto sufrí las consecuencias de haberme salido de mis casillas, pues al día siguiente de salir el artículo recibí otra lisonjera invitación a hacer un artículo semejante para otros. Después vino otra lisonjera invitación a tomar parte en una de esas conversaciones por radio, respondiendo a preguntas de oyentes («Predicciones rápidas sobre cualquier tema, de memoria, sin consultar libros doctor Asimov»), etc. Naturalmente tuve que seguir aceptando lisonjeras invitaciones.

Todavía hoy, si no hago terribles esfuerzos por zafarme, me expongo a quedar clasificado, mientras viva, como infalible escrutador de lo futuro, perdiendo para siempre las apacibles delicias de la chifladura.

Quizá pueda romper el encanto, aprovechando esta tribuna para exponer mi opinión sobre las posibilidades pronosticadoras de la novela científica. Así la gente, obteniendo una visión exacta de todo ello, dejará de pedirme que haga el ingrato papel de profeta.

Para el profano, es decir, para quienes, por vivir fuera de nuestro recinto, asocian al término «ficción científica» peludas visiones de Flash Gordon y de monstruos del Lago Negro, el único aspecto serio de la ficción científica es que predice cosas, y con eso suelen significar que predice cosas *concretas.*

El profano, enterado de que autores de ficción científica trataron de la energía atómica décadas antes de inventarse la bomba, imagina que esos escritores expusieron

concienzudamente la teoría de la fisión uránica. O sabiendo que autores de ficción científica han descrito excursiones a la luna, imagina que tales autores publicaban detallados planos de cohetes de tres etapas.

Mas la verdad es que los escritores de ficción científica son invariablemente inconcretos. El simple hecho de que yo hable de robots positrónicos, y diga que obedecen a las «tres leyes del robot», no tiene el menor valor predictivo desde el punto de vista ingenieril. Imaginaos, como ejemplo, la conversación que un entrevistador (E) tiene conmigo (A).

, E.: ¿Qué es un robot positrónico?

A.: Un robot con cerebro positrónico.

E.: ¿Y qué es un cerebro positrónico?

A.: Un cerebro en el que corrimientos positrónicos sustituyen a los corrimientos electrónicos del cerebro humano.

E.: Pero ¿por qué han de ser los positrones superiores para eso a los electrones?

A.: No lo sé.

E.: ¿Como evita usted que sus positrones se combinen con electrones, produciendo una inundación de energía que convertiría al robot en un charco de metal fundido?

A.: No tengo la menor idea.

E.: Ya propósito, ¿cómo somete usted flujos protónicos a las «tres leyes del robot»?

A.: No tengo ni noción.

Eso no me avergüenza. Al escribir mis cuentos de robots, no era mi intención explicar en detalle ingeniería de robots. Me propuse sólo representar una sociedad en que abundasen los robots avanzados, procurando sacar las posibles consecuencias.

Mi enfoque no era en modo alguno lo específico, sino las generalidades. Claro que una predicción específica puede acertar, pero yo apostaría a que prácticamente todos esos aciertos llevan una circunstancia modificativa, que hace que tal predicción no sea una predicción auténtica.

Puedo citar un ejemplo tomado de mis propios relatos, pero antes de hacerlo, malquistándome con todos y cada uno, porque parece que me pongo por modelo a mí mismo, quiero contar un caso en que mi pronóstico resultó ridículamente inexacto.

Una vez escribí un cuento breve titulado *Everest,* en el cual expliqué el fracaso humano en escalar ese monte, diciendo que su cumbre estaba ocupada por unos observadores marcianos y que los «abominables hombres de las nieves» eran realmente... bueno, ya lo adivináis.

Entregué ese cuento el 7 de abril de 1953, y el Everest fue escalado con éxito, sin trazas de marcianos, el 29 de mayo siguiente. Pero el cuento se publicó medio año después.

Ahora ya me atrevo a contar algo que *suena* a predicción acertada. En mi cuento *Superneutrón* un personaje le pregunta a otro sí se recuerda cómo eran «las primeras centrales de energía atómica de hace ciento setenta años y cómo funcionaban».

«Creo —era la respuesta— que obtenían energía por el método clásico de la fisión del uranio. Bombardeaban uranio con neutrones lentos y lo escindían en masurio, bario, rayos gamma y nuevos neutrones, estableciendo un proceso cíclico.»

Cuando le leo a alguien ese párrafo no dice nada, hasta que le muestro que la revista en que apareció ese cuento lleva fecha de septiembre de 1941, y le digo que lo entregué en julio, y que lo escribí en diciembre de 1940, es decir, *dos años antes* de que se construyese el primer reactor nuclear automantenido y *doce* antes de que se construyese la primera planta de energía nuclear, destinada a producir electricidad para usos pacíficos.

Cierto que no fui capaz de predecir que el elemento cuarenta y tres sólo temporalmente se llamó masurio, cuando por error creyeron descubrirlo; y que cuando lo descubrieron de

verdad lo llamaron «tecnecio». En realidad su descubrimiento verdadero ocurrió dos años antes de escribirse mi cuento, pero su nuevo nombre no había llegado a mí. Además tampoco tuve el talento de decir «reacción en cadena», en vez de «proceso cíclico».

Así y todo, ¿no es una predicción asombrosa?

¡Tontería! No hubo en absoluto predicción.

El cuento fue escrito *un año después* de descubrirse y publicarse la fisión del uranio. Hecha pública esa fisión, todo lo dicho acerca de bombas atómicas y fábricas de energía nuclear era una simple elaboración, evidente por sí misma.

A principios de 1944 apareció el relato de Cleve Cartmill *Línea de Muerte.* Descubría las consecuencias de una bomba atómica con tan gráfica corrección (quince meses antes de la explosión de la primera bomba atómica en Alamogordo), que la F.B.I. fue alertada. Y tampoco eso fue predicción auténtica, sino simple elaboración, evidente por sí, de un descubrimiento conocido.

Mi tesis, en suma, es que no son *los detalles* lo predicho; los puntos concretos de ingeniería, los artilugios, las artimañas. Las predicciones de esa clase, o no son predicciones, o son golpes fortuitos de suerte, sin importancia en todo caso.

La vaga brocha gorda con que bosqueja lo futuro el escritor de ficción científica resulta particularmente adecuada para los amplios y vagos movimientos de reacción social. A ese escritor le incumben los grandes rasgos de la historia, no las minucias y maquinarias.

Permitidme un ejemplo de lo que considero el más notable caso de auténtico pronóstico, aparecido en relatos de ficción científica. Se trata de *Solución Incompleta,* por Roberto Heinlein, bajo el pseudónimo Anson MacDonald. Apareció a principios de 1941, medio año antes de Pearl Harbor, cuando Hitler estaba en el apogeo de sus conquistas.

Trata el relato del final de la Segunda Guerra Mundial y se equivoca en muchos detalles. Por ejemplo, Heinlein no llegó a predecir Pearl Harbor; así que, en su historia, los Estados Unidos permanecen en paz.

Pero sí pronosticó que los Estados Unidos organizarían un enorme programa de investigación para desarrollar armas nucleares. Verdad es que no fue una bomba atómica lo que Heinlein les hizo inventar, sino el «polvo atómico». Se saltó la bomba, por decirlo así, y fue derecho al residuo.

Como en esa historia no había habido Pearl Harbor, el polvo atómico no se lanzó sobre ciudades japonesas, sino alemanas. Terminada la guerra, las demás naciones (sobre todo la Rusia soviética) se guardaban de perturbar la paz, ante la simple existencia de la bomba en manos americanas.

Pero ahora, ¿qué habría que hacer con esa arma? El narrador supone regocijado (aun antes de usarse el «polvo») que con ese poder en manos norteamericanas la paz mundial queda impuesta y el milenio se inaugurará bajo el auspicio de una «Pax Americana».

Pero el protagonista discurre de otro modo. Dice (y espero que Heinlein no tomará a mal que le copie dos párrafos):

¡Hum! ¡Ojalá fuese así de sencillo! Pero no seguirá siendo secreto nuestro; no cuentes con ello. Ni aunque consigamos guardar silencio absoluto; a cualquiera le bastará la pista dejada por el propio polvo mismo, y ya será sólo cuestión de tiempo el que alguna otra nación desarrolle una técnica para fabricarlo. Es imposible impedir que los cerebros funcionen, John; y la reinvención del método es matemáticamente segura, en cuanto sepan lo que están buscando. Y el uranio es una sustancia bastante abundante, bien repartida por el globo; ¡no lo olvides!

Ocurrirá lo siguiente: Una vez descubierto el secreto —y llegará a descubrirse si usamos esos polvos—, el mundo entero será comparable a una habitación llena de hombres, provisto cada uno de un arma del 0,45 cargada. No pueden salir de la habitación y cada uno depende,

para seguir vivo, de la buena voluntad de los demás. Todo ofensiva sin defensa. ¿Me entiendes?

¿Qué hacer entonces? Considerad de nuevo el título de Heinlein *Solución Incompleta.*

El hecho es que Heinlein predijo la «amenaza nuclear» que hoy existe antes de que se iniciase la era nuclear. Siete años largos después de haber hecho Heinlein su predicción, los dirigentes políticos norteamericanos seguían arrullando su sueño con la seguridad de que teníamos, en el secreto de la bomba, un monopolio que duraría generaciones, por aquello de que «sólo los yanquis saben hacerlas».

La amenaza nuclear no sólo es más difícil de predecir que la bomba, sino que su predicción era la que importaba realmente. Pensad cuánto más fácil fue inventar la bomba, que encontrar una salida segura de la «amenaza nuclear», según estamos viendo. Meditemos, pues, qué útil les hubiese sido a los estadistas haber dedicado algún tiempo a pensar en las consecuencias de la bomba y no sólo en fabricarla.

La ficción científica cumple, pues, su misión más útil, al predecir no artificios, sino consecuencias sociales. En esta tarea de predecir consecuencias sociales podría ejercer formidable impulso, para perfeccionar la humanidad.

Permitidme que intente esclarecer aún más este punto, presentando un caso hipotético. Suponeos en el año 1880, y que el automóvil es el sugestivo ingenio de lo futuro, que concentra la atención de todos los escritores de ficción científica. ¿Qué clase de novela suponéis que podía haberse escrito en 1880, acerca del automóvil, entonces futuro?

Podría haberse tomado el automóvil como un simple artefacto. La novela saldría llena de toda clase de galimatías científicos, describiendo el funcionamiento del automóvil. Se contaría el apuro producido por el fallo del «framistán» en el momento crítico, y cómo se salvaría el protagonista, improvisando un «escape» con el coche de un niño, y enganchándolo astutamente al «bispalador», para «mutonar la carrogela».

(Todo sin sentido, claro; pero yo os citaría docenas de cuentos de ese mismísimo estilo, si no fuese porque los autores tienen tan buenos puños como mal genio.)

También puede considerarse al automóvil como un simple accesorio en las aventuras. Cualquier cosa que pueda hacerse a caballo lo hace uno en automóvil; pues bien, en un cuento del Oeste, donde dice «caballo» se pone «automóvil».

Escribiríamos, pues, por ejemplo: «El automóvil tronaba calle abajo, batiendo con sus poderosos neumáticos, mientras sacudía furiosamente a uno y otro lado sus piezas traseras, y su fulgurante y espumosa toma de aire aparecía orlada de aceite.» Luego, cuando el coche ha cumplido su misión de rescatar a la muchacha y fastidiar a los malos, «mete su manga de tomar esencia en un cubo de gasolina y se aprovisiona tranquilamente».

Claro que esto es sátira, pero dudo que diste mucho de la realidad. Yo apostaría a que montones de aspirantes a brillar en la novela científica empiezan relatos como éste: «La nave espacial patinó al detenerse a ocho millones de kilómetros de Venus; sus frenos chirriaron humeantes.»

El motivo único de que no veáis tales relatos es que antes los ven los editores.

Es notorio que escribir una novela científica en que un automóvil no es más que un ingenio o un supercaballo, es perder el tiempo. Podrá, sí, proporcionarle al autor un honrado dólar y al lector una hora de honrado esparcimiento. Pero ¿dónde está su importancia? Habrá predicho el automóvil, pero predecir sólo la existencia del automóvil no es *nada.*

¿Qué hay del efecto del automóvil en la sociedad y en la gente? Al cabo lo que le interesa al público es la gente.

Suponed, por ejemplo, que consideráis el automóvil como un objeto disponible a millones, para uso de cualquiera que desee comprar uno. (Recordad que estamos en 1880.) Imaginaos una población entera sobre ruedas.

¿No se extenderán las ciudades, al no necesitar nadie vivir cerca del sitio en que trabaja? ¡Poder vivir a diez millas y, sin embargo, presentarse veloz por la mañana y largarse por las tardes! En suma, las ciudades, ¿no ampliarán sus suburbios, mientras sus centros decaen?

Y si hay millones de coches, ¿no habrá que llenar la nación de anchas carreteras? ¿Y cómo modificará eso las vacaciones? ¿Y la busca de trabajo? ¿Y los ferrocarriles? Y si los jóvenes pueden alejarse en los autos, ¿cómo cambiará eso su situación social? ¿Y el sexo y las mujeres?

Diréis, claro, que es muy fácil, mirando desde lo presente la situación pre-automovilística, hablar de lo que tenía que suceder; y yo he de admitir que, en efecto, nadie me supera en afición a hacer predicciones infalibles de lo pasado.

Pero tampoco es completamente imposible prever. Allá en 1901, H. G. Wells, apenas iniciada la era del automóvil, escribió un libro titulado *Previsiones acerca de la reacción del progreso mecánico y científico sobre la vida y el pensamiento humanos,* en el cual, entre otras cosas, describe la moderna era del motor con asombrosa exactitud.

Muy bien: vais a escribir, pues, una novela científica en 1880, acerca del automóvil, haciendo algo menos trivial que predecir sencillamente ese vehículo. Vais a escoger vuestra trama en los fascinantes cambios que produce el auto en la sociedad. Es más, vais a elegir uno que ni siquiera H. G. Wells pronosticó.

Empecemos. Ya habéis motorizado la sociedad; cada cabeza de familia tiene un auto, algunos tienen dos.

Todas las mañanas, desde los suburbios circundantes, entran en la ciudad varios cientos de miles de coches; todas las tardes vuelven a salir. La ciudad se convierte en un gigantesco organismo, que absorbe coches por la mañana y los expele por la tarde.

Hasta aquí vamos bien. Ahora interviene nuestro protagonista, sujeto corriente y sencillo; mujer, dos hijos; sentido del humor, conductor excelente. La ciudad lo sorbe: vedlo guiando hacia ella, entre muchos, muchos otros coches, convergentes todos hacia su interior.

¡Ah! Pero cuando todos entran en la ciudad, ¿dónde se meten?

Pues ¡ahí está! ¡Ahí está! De aquí el título de la obra *Aplastamiento.* ¿Y el contenido? Una deliciosa sátira de cómo nuestro héroe pasa todo el día buscando dónde aparcar, sin hallar más que calles atascadas, taxistas, guardias de tráfico, camiones, zonas prohibidas, garajes abarrotados, bocas de riego, etc.

Sátira deliciosa en 1880. Hoy tomaría carácter, más bien, de fuerte tragedia realista.

Ahora recapacitemos. Si en 1880 se hubiera escrito realmente esa historia, y hubiese llamado la atención lo suficiente para interesar a los estadistas, ¿no hubiese resultado un tantico posible que desde 1880 se hubiese planificado el crecimiento de las ciudades, teniendo presente la futura motorización?

Pensad en ello los que vivís en ciudades como Nueva York y Boston, que han sido concienzudamente planificadas para los ingenuos carros de mano, y decidme qué recompensa no habría merecido el escritor que hubiese hecho esa advertencia.

¿Veis, pues, cómo la predicción importante no es el automóvil, sino el problema de aparcarlo; no la radio, sino los seriales; no el impuesto, sino la declaración de ingresos; no la bomba atómica, sino la amenaza nuclear? No la acción, en suma, sino la reacción.

Claro que esperar que el hombre de 1880 planificase ciudades para una sociedad acaso motorizada es quizá esperar demasiado de la humana naturaleza. Pero sospecho que esperar hoy día lo equivalente es esperar lo estrictamente indispensable.

Llevamos ya un siglo presenciando cómo se producen cambios sociales con rapidez cada vez mayor, viéndonos sorprender desprevenidos por las consecuencias de un creciente desfase.

A estas alturas ya hemos aprendido a esperar cambios y muy radicales, y vamos resignándonos a la necesidad de prevenirnos con planificaciones previas.

La misma existencia y popularidad de la novela científica indica hasta qué punto se van considerando inevitables las transformaciones, y una de las misiones de la novela científica es hacerle menos desabrido al hombre normal el hecho del cambio.

Por mucho que el vulgo en general ignore la ficción científica y se ría de ella, no puede quedar del todo ajeno a su contenido. Algunos de sus peculiares temas se han infiltrado en la conciencia popular, aunque sólo sea en forma de historietas, muy vagas y desfiguradas. Por eso la aparición de armas nucleares, proyectiles cohetes y satélites artificiales no ha chocado con la resistencia psicológica que se le habría opuesto antaño.

Pero basta ya de lo pasado. Estamos en lo presente y la tarea de cuantos escribimos ficciones científicas consiste en contemplar lo futuro; el auténtico de ahora, no el retrospectivo de 1880.

Estamos sometidos a cuatro series, por lo menos, de cambios revolucionarios de primera categoría, cada uno de los cuales sigue una trayectoria clara e inevitable.

¿Cuál será la reacción a cada uno de ellos?

El primero y más alarmante es la «explosión demográfica», que la novela científica ha tratado de numerosas maneras. Yo recuerdo muchas obras construidas sobre el fondo de un mundo superpoblado. *Las cuevas de acero* es un ejemplo entre mis propios libros, y otro es *Planeta en salsa* («Comerciantes espaciales), de Federico Pohl y Cirilo Kornbluth.

La fábula más violenta y efectista de esta clase (al menos para mí) es *Los empadronadores,* de Federico Pohl, en que la población es mantenida al nivel deseado, por el sencillo procedimiento de hacer un censo mundial cada diez años, y fusilar a uno de cada trece alistados, o de cada quince o cada nueve, según la proporción que se juzgue necesaria.

Eso es «anti-predicción», si me permitís acuñar la palabra. Fred Pohl no pensó evidentemente que eso iba a ocurrir. Sabíamos, sabemos todos, que tal solución es inconcebible.

Pero la «anti-predicción» de algo imposible tiene también su utilidad. De puro escandalosa y desconcertante, puede obligar a detenerse y meditar, a gentes demasiado propensas a resolver lo insoluble ignorándolo. ¡Bien! No mataremos al azar al exceso de pobladores; pero ¿qué otra cosa podremos hacer?

Otra transformación revolucionaria es la «explosión del automatismo». Eso implica, es claro, el rápido advenimiento de un mundo equivalente a la situación, familiar en la novela científica, en que todos los trabajos manuales, y muchos de los mentales, son hechos por robots. ¿Qué le sucede a la humanidad en ese caso?

Carlos Capek abordó el tema en *R. U. R.,* ya en 1921. Un ejemplo más reciente lo trata Jack Williamson en *Con las manos cruzadas.*

Mas, ¿en qué clase de mundo viviremos, cuando el trabajo interesante se convierta en un lujo, al alcance de los menos; cuando el aburrimiento se haga enfermedad mundial? ¿Pueden los tiempos ponerse aún más neuróticos que ahora? Pensadlo leyendo *Atracción venidera,* de Fritz Leiber, sobre nuestro neurótico porvenir.

Un tercer cambio revolucionario es la «explosión del saber», pues los descubrimientos científicos se producen con tal rapidez y densidad, que la mente humana se ha quedado incapaz de comprenderlos en toda su profundidad, fuera de «especialidades» sumamente estrechas.

Un ensayo mío en este campo fue una obra titulada *Mano Muerta,* en que yo postulaba la existencia de escritores científicos profesionales, que espiaban en las obras científicas de otros, y luego escribían artículos concisos y claros. Además servían de puente entre las especialidades, con su conocimiento ínter-doctrinal, amplio aunque poco profundo.

Un cuarto cambio radical es la «explosión libertadora», la liberación de las antiguas colonias, la revolución de los «indígenas» y las concomitantes reclamaciones de derechos civiles dentro de los Estados Unidos.

Quizá en este campo la ficción científica no ha trabajado tan concienzudamente como en los anteriores. Ray Bradbury tiene una excelente obra titulada, si recuerdo bien. *Camino en medio del aire,* sobre el efecto en los Estados Unidos de una emigración en masa de negros a Marte. Yo mismo, más realista en cierto modo, contemplé la posibilidad de un África independiente en mi obra *Conflicto evitable,* publicada en 1950, bien antes de las realidades, por cierto. Pero también en mi novela *Las corrientes del espacio* traté yo, aunque no muy explícitamente, lo confieso, del papel del negro en la colonización de la Galaxia.

Estos son, sin duda, algunos de los grandes cambios que nos esperan. Cada uno de ellas bastará para trastornar el mundo que conocemos, antes de que pase una sola generación. Si hemos de evitar que los trastornos degeneren en desintegración, tenemos que hacer conjeturas inteligentes sobre dónde nos llevan, y actuar en consonancia *desde ahora.*

Es misión de los escritores de novelas científicas, aparte de ganarse la vida y divertir a los lectores, hacer tales conjeturas; y eso les convierte, a mi juicio, en los más importantes servidores que hoy tiene la humanidad.

Cierto que ya no son sólo los autores de novelas científicas quienes hacen esas conjeturas. Hemos progresado tanto en esto, que varias agencias gubernamentales, institutos de investigación y empresas industriales hacen esfuerzos desesperados por descifrar en la nebulosa bola de cristal esos misterios. Pero es mi convicción personal que casi todos los funcionarios ministeriales o de empresa, dedicados a eso, fueron alguna vez lectores de novelas científicas.

Conque mirad lo que he hecho. Comencé el capítulo con la intención de quejarme de tener que escribir tantos difíciles artículos de predicción, y lo acabo convencido de que debería escribir más aún.

¡Gran prueba de mis dotes proféticas!

2. Tamaño justo

Hace pocos días iba yo calle adelante, caminando de prisa hacia no sé dónde y, como suelo a veces, sumido en profunda cavilación.

Ahora bien, ignoro qué cara pondrán ustedes cuando están embargados por hondas reflexiones, pero a mí me dicen que mi rostro, en tales casos, se frunce en una expresión de increíble ferocidad. Me cuesta trabajo creerlo, pues son proverbiales mi humor risueño, mi despreocupación y buena pasta; pero algún motivo tendrían mis hijos, de pequeños, para huir gritando de la mesa, cuando yo recordaba algún punto espinoso de mis escritos, que requería concentrada meditación.

Aquella vez, cuando marchaba tan abstraído, un extraño a quien sus asuntos llevaban en dirección opuesta me dijo al cruzarnos: «¡Sonría usted!»

Me paré en seco, sonreí y dije: «¿Por qué?»

Y él, sonriéndose también, contestó: «Porque por mucho que le ocurra a usted es imposible que sea para tanto.»

Nos separamos y yo hice cuanto pude para seguir meditando sin dejar de sonreír; pero sospecho que, poco a poco, la sonrisa se desvanecería y volvería el aspecto feroz...

Por curiosidad tomé buena nota de lo que estaba pensando entonces, para que, a ser posible, me sirviese de tema de un ensayo científico.

Resultó que estaba pensando en un nuevo programa de televisión, titulado «Mundo de gigantes», según el cual un grupo de seres humanos queda atrapado en un mundo exactamente igual a la tierra, salvo que todo es de gigantescas proporciones. Para precisar, según los presentadores del programa, en el mundo de los gigantes era todo doce veces mayor que los objetos terrestres análogos.

Eso era llevar al extremo un tipo muy conocido de argumentos de la que podríamos llamar «ficción científica infantil». Con esta denominación designo la clase de ficción científica, producida por hombres que indudablemente serán cariñosos con sus madres y estimables miembros de la sociedad, pero que, en cuanto a sus nociones científicas, parecen balbuceantes bebés.

En lo remotos, malos tiempos, de la ficción científica por entregas había innumerables historias, por ejemplo, de insectos y gigantes. Se razonaba que, puesto que una pulga puede saltar muchas veces su propia longitud y arrastrar muchas veces su propio peso, una pulga de tamaño humano podría saltar media milla, con dos toneladas de carga a la espalda. Y naturalmente sería mucho más peligrosa que un tiranosaurio. Innecesario es advertir que eso es pura bazofia, y que tales disparates han desaparecido en absoluto de la novela científica actual.

Pero el cine y la televisión, con notables y honrosas excepciones como «Star Trek», siguen aún en la fase infantil, en lo que se refiere a la novela científica. Su modo de producir sensación es presentarnos monos gigantes, arañas, lagartos, cangrejos gigantes, gigantescas mujeres y amebas; todo gigantesco.

Pero nada de eso sería posible, ni por un instante, en virtud de la llamada ley cuadrado-cúbica, expuesta por primera vez por Galileo hace tres centurias y media.

Para explicar del modo más sencillo lo que significa esa ley, partiremos de un cubo de *n* pulgadas * de arista.

El volumen de ese cubo es $n \times n \times n$; o sea, n^3. Eso quiere decir que un cubo de 1 pulgada de arista tiene un volumen de una pulgada cúbica; uno de 2 pulgadas de arista tiene 8 pulgadas cúbicas de volumen, y uno de 3 pulgadas de arista, 27 pulgadas cúbicas de volumen.

* O centímetros. Las unidades no influyen aquí para nada.— (N. del T.)

Dicho de otro modo, el cubo de 3 pulgadas de arista podemos dividirlo con una sierra en 27 cubitos de 1 pulgada de arista. Intentadlo y os convenceréis.

Pero ¿qué pasa con la superficie de un cubo? Dicha superficie consta de seis cuadrados; por eso los dados tienen las caras numeradas desde • a ::: . Si la arista del cubo mide *n* pulgadas, cada cara tiene $n \times n$, o sea, n^2 de área; y entre las seis tendrán un área de $6n^2$. Eso significa que un cubo de 1 pulgada de arista tiene 6 pulgadas cuadradas de superficie; uno de 2 pulgadas de arista tiene una superficie de 24 pulgadas cuadradas; uno de 3 pulgadas de arista tiene una superficie de 54 pulgadas cuadradas, etc.

Como un cubo de *n* pulgadas de arista tiene $6n^2$ de superficie y n^3 de volumen, eso significa que la superficie de un cubo crece como la potencia segunda, o cuadrado, de la longitud de la arista; mientras que el volumen de un cubo crece como la potencia tercera, o cubo, de dicha longitud. Si duplicamos la arista, multiplicaremos la superficie por $4=(2^2)$ y el volumen por $8=(2^3)$. Análogamente, al triplicar la arista, la superficie del cubo se multiplica por 9 y el volumen por 27.

El volumen crece mucho más de prisa que la superficie, y para mostrarlo más claro aún he aquí una tabla.

Tabla 1

Arista (longitud)	Superficie (área)	*Volumen*	*Relación volumen/ superficie*
1	6	1	1/16
3	34	27	1/2
6	216	216	1
10	600	1000	13/5
25	3750	15625	41/6

Cuanto mayor sea un cubo, más volumen tendrá por cada pulgada cuadrada de superficie. Por decirlo así, cuanto mayor sea, mayor proporción de materia suya quedará «por dentro».

Podríais demostrar que ocurre exactamente lo mismo con cualquier cuerpo geométrico: tetraedro, esfera, elipsoides, etc. Y también ocurre con cuerpos irregulares cualesquiera, suponiendo, suposición importante, que cada cuerpo conserve al crecer idénticas proporciones.

Podemos, pues, enunciar la ley cuadrado-cúbica como sigue. Al crecer un cuerpo tridimensional cualquiera, sin cambiar de forma, su superficie crecerá como el cuadrado de cualquiera de sus líneas, y el volumen como el cubo de la misma.

Esto tiene importante relación con la ingeniería estructural de los cuerpos animados e inanimados; pues algunas de sus propiedades dependen del volumen y otras de la superficie. Como las que dependen del volumen crecen más de prisa con el tamaño que las que dependen de la superficie, hay muchas ocasiones en que el tamaño establece diferencias considerables.

El ejemplo más sencillo lo ofrecen la masa y la sustentación. La masa de un cuerpo, de forma y densidad constantes (o su peso, si permanece en punto fijo de la tierra), depende de su volumen. La sustentación depende de la superficie que esté apoyada en el suelo.

Imaginemos, por ejemplo, un cubo de materia de una densidad de una libra por pulgada cúbica. Un cubo de una pulgada de arista de esa materia, apoyado en una de sus caras, pesa una libra y descansa en una pulgada cuadrada de superficie. La presión sobre la superficie soporte vale una libra por pulgada cuadrada.

Un cubo de diez pulgadas de arista de esa materia pesa mil libras y descansa en una superficie de cien pulgadas cuadradas. La presión sobre esa superficie soporte vale diez libras por pulgada cuadrada.

Al continuar creciendo el cubo, sigue aumentando la presión sobre la superficie soporte. Esa presión termina por ser tan grande, que los enlaces químicos entre los átomos y las moléculas de esa materia comenzarán a ceder. El cubo empezará a aplastarse bajo la acción de su peso.

Cuanto más resistente sea una sustancia, más podrá crecer antes de que se alcance ese punto crítico; pero para todas las sustancias terminará por alcanzarse. En un campo gravitatorio dado, hay un tamaño máximo para los cubos de cualquier materia.

Esto ocurrirá aunque no haya campo gravitatorio exterior, porque, al crecer el cubo, aumenta su propio campo gravitatorio, obligando al cuerpo a reducirse o, mejor dicho, a tomar una forma de mínimo contenido de energía, que resulta ser aproximadamente una esfera; o un elipsoide de revolución, si está girando.

Lo dicho del cubo vale para todo sólido, incluso el cuerpo humano. Imaginemos que un hombre pesa 175 libras y gasta zapatos cuyas suelas tienen 50 pulgadas cuadradas de superficie total. Puesto en pie, cada pulgada cuadrada de suela de sus zapatos soporta 3,5 libras. (Esto es una simplificación; ni las suelas son planas, ni se reparten el peso por igual; pero eso no desmiente el principio.)

Supongamos ahora que, de repente, ese hombre multiplica por doce todas sus medidas, como en el «mundo de los gigantes», conservando, por consiguiente, todas sus proporciones iniciales. Ahora su estatura, en vez de 5 pies y 10 pulgadas, es de 70 pies.

El gigante pesará 175X12x12x12, o sea, unas 140 *toneladas;* tanto como las mayores ballenas. Pero la superficie de sus suelas sólo vale 50X12x12, o sea, 7.200 pulgadas cuadradas. Puesto en pie, cada pulgada cuadrada de suela tiene que soportar 42 libras: doce veces más que antes.

Esto vale para todo el mecanismo sustentador. Cada pulgada cuadrada de sección del fémur tiene que soportar doce veces más peso que de ordinario; cada pulgada cuadrada de sección de músculo tiene que ejercer un tirón doce veces mayor que de ordinario, para que el gigante se ponga en pie, si está sentado.

Para ver lo que le sucede al tal gigante, suponed que cargamos 42 libras (12 veces lo normal) en cada pulgada cuadrada de nuestras suelas. Para hacerlo, habríamos de tener un peso de una tonelada, distribuido uniformemente en nuestro cuerpo. Eso nos derribaría por tierra y nos mataría por aplastamiento.

Así, pues, los colosos del «Mundo de los gigantes», ¿caerían por tierra y morirían aplastados por su propio peso? No, desde luego, necesariamente. Si esa emisión la dirigiera un autor *competente* de novelas científicas, advertiría que el fémur de los gigantes era de acero cromado; que la gravedad en el planeta era más débil; que los músculos funcionaban conforme a otras leyes que los nuestros. Pero claro que nada de eso se advierte. He dicho un autor *competente* de novelas científicas.

No creáis que es demasiado pesimismo hablar de muerte por aplastamiento. Se dan casos. A veces una ballena, muchísimo menor que nuestros míticos gigantes humanos, queda varada en una playa y ya no se libra de morir, aplastada literalmente por su propio peso.

(En el agua la ballena no corre ese peligro, porque allí está soportada, no por la rigidez de sus huesos, sino por el empuje del medio líquido, que depende del volumen del animal. Es decir, que peso y empuje crecen *ambos* como el cubo de las dimensiones lineales, así que el tamaño no dificulta el soporte. Una enorme ballena maniobra en el agua con tanta facilidad como un diminuto boquerón, al menos en cuanto al soporte.)

Claro que, aun limitándonos a mamíferos terrestres, es un hecho que existen a la vez enanos y gigantes, construidos según el mismo patrón estructural de un tronco sobre cuatro patas. Hay mamíferos tan pequeños como la musaraña (menos de una décima de onza, unos 2,8 gramos) y tan grandes como el extinguido baluquiterio, que pesaría no menos de unas veinte toneladas.

¿Cómo compaginar esas diferencias de tamaño con la ley cuadrado-cúbica? Recordemos la condición: que no varíen las formas, ni —añadamos ahora— las propiedades estructurales.

El caso quizá más notable de olvido de esa condición lo ofrece el astrónomo canadiense Simón Newcomb, quien muy a principios del siglo xx escribió una serie de elocuentes artículos, en que trataba de mitigar el entusiasmo producido por la posibilidad de construir ingenios voladores más pesados que el aire.

Insistía Newcomb meticulosamente, no menos que yo en este artículo, en la existencia de la ley cuadrado cúbica. Explicaba que el peso de un aeroplano depende de su volumen, mientras que de su sustentación depende el área de la superficie plana que puede presentarle al aire. Al aumentar el tamaño, el peso crecería más rápidamente que la superficie, y cada pulgada cuadrada de superficie de las alas tendría que sustentar pesos cada vez mayores.

Cuando un aeroplano sea lo bastante grande para contener a un hombre, decía Newcomb, pesará demasiado para que lo sustenten sus alas. Aquello le parecía tan sencillo como un problema de aritmética para muchachos.

Pero en esto vinieron los hermanos Wright y quedó evidenciada la posibilidad de una máquina voladora, capaz de elevar a un hombre. Eso no desconcertó en modo alguno a Newcomb; admitió que, en efecto, era posible una máquina de ese tamaño; pero al construirla capaz de elevar a dos hombres afirmó que pesaría demasiado para que sus alas la sustentasen.

Como Newcomb murió en 1909, no llegó a ver el papel que jugó el aeroplano en la Primera Guerra Mundial.

El error de Newcomb es, ¡ay!, harto común entre los científicos. Enamorado de una fórmula se empeñó en llevarla más allá de los límites en que es aplicable. Supuso que al construir aeroplanos mayores se conservarían sus proporciones; que los materiales serían los mismos, etc.

Pero de hecho las alas de los aviones se estaban perfeccionando continuamente, para lograr más sustentación por pulgada cuadrada; se diseñaban motores que rendían más impulso por unidad de peso; se empleaban materiales más fuertes y menos densos, para construir el aeroplano. En suma, perfeccionando la técnica, la sustentación se aumentó mucho más rápidamente que el cuadrado de las dimensiones lineales y el peso se aumentó mucho menos rápidamente que su cubo.

Los organismos vivientes hacen lo mismo, en lo posible. El pájaro mosca sólo pesa 0,07 onzas (unos 2 gramos), mientras que la avutarda Kori sudafricana se sospecha que puede alcanzar a veces 50 libras (122,5 Kg.) de peso. Hay, pues, un margen de pesos desde 1 a 11.000.

Sin embargo, pájaros mosca y avutardas vuelan con alas de plumas.

Pero ¡buena diferencia! Las alas de la avutarda son mucho más largas y estrechas, comparadas con el cuerpo, que las del pájaro mosca. Los huesos de la avutarda están ahuecados hasta el último extremo, para aligerarlos todo lo posible, con el mínimo menoscabo de su resistencia.

Aquí también hay cambios, gracias a los cuales el peso crece más despacio que el cubo y la sustentación más de prisa que el cuadrado.

En los mamíferos, el margen de pesos entre la mínima musaraña y el baluquiterio es de 1 a 6.400.000, para el mismo esquema general de un tronco sobre cuatro patas; pero éstas no tienen en modo alguno las mismas proporciones.

Mirando, por este orden, patas de musaraña, ratón, cabra, caballo y elefante, se ve que van siendo cada vez más gruesas, aun en proporción con la longitud total del cuerpo. Esto quedaría muy claro haciendo dibujos de la misma altura, de todos esos animales.

Si un ratón adquiere el tamaño de un elefante, sus patas quedarían relativamente muy largas y delgadas y se quebrarían bajo el peso. Un elefante, reducido a tamaño de ratón, tendría patas gordísimas, de aspecto increíblemente tosco.

En otros términos, las proporciones de un animal, la forma de sus patas y alas, por ejemplo, están condicionadas por su tamaño y resultarían absurdas si éste cambiase, sin un cambio adecuado de proporciones.

Entonces, ¿temen ustedes de veras que sería peligroso un insecto de tamaño humano? Cuando ven ustedes una mosca común, fíjense en sus patas. Son simples hebras, pero adecuadas para sustentar el peso de la mosca. Agrandémosla hasta el tamaño de hombre y no podrá moverse; ni tampoco una pulga, ni un saltamontes ni un escarabajo. Ningún insecto de tamaño humano que conservase las proporciones corrientes de los insectos en el campo gravitatorio terrestre, podría andar, volar, saltar, ni avanzar de ningún otro modo, ni la menor fracción de una pulgada.

No sólo dependen del tamaño y la forma la locomoción y el soporte. Hay otras muchas propiedades que están adaptadas precisamente a un cierto tamaño.

Por ejemplo, la cantidad de calor producido por las reacciones químicas dentro de un organismo depende del peso del tejido reaccionante, que a su vez depende del volumen del cuerpo. La rapidez con que se pierde ese calor depende, en términos generales, de la superficie exterior del animal. Así, pues, cuanto mayor sea este, más calor retendrá, ya que la producción crece más deprisa que la pérdida.

En general, pues, a igualdad aproximada de otros factores, un animal pequeño necesita tener un metabolismo más rápido que uno grande, para reemplazar la energía que se le escapa con más rapidez. Las musarañas y pájaros mosca tienen que estar siempre comiendo, o morirían de hambre en cuestión de horas; mientras que un animal grande puede ayunar largos períodos.

Resulta también que en las regiones polares, donde el frío reclama recursos conducentes a conservar el calor, el tamaño grande es muy conveniente en ese sentido. Los osos polares, almizcleros y morsas se mantienen calientes, en parte, por ser grandes. Y, naturalmente, ése puede haber sido uno de los factores que hicieron útil el tamaño grande en la era de los dinosaurios. Los reptiles, faltos de recursos especiales para conservar temperatura alta, podían retener el calor que desarrollaban, con tanta mayor eficacia cuanto mayores eran.

Eso significa que toda la estructura metabólica de un organismo guarda relación con su tamaño.

Mas ¿qué diremos de la absorción de oxígeno? La cantidad de materia que lo precisa depende del volumen del organismo; pero la rapidez con que el oxígeno se absorbe depende de la superficie interna de los pulmones.

A los animales pequeños de sangre fría les bastan pulmones sencillos en forma de sacos; pero los animales de sangre caliente necesitan mucho más oxígeno, sobre todo los grandes. Si los pulmones humanos fuesen simples sacos, le ofreceríamos al aire unos 2 pies cuadrados (0.1858 m^2 de superficie, y si no tuviésemos más, nos asfixiaríamos instantáneamente. Nuestros pulmones están divididos en unos 600 millones de celdillas, con una superficie total de 600 pies cuadrados (unos 56 $m.^2$), por lo menos.

Análogamente, la cantidad de sangre que hay que filtrar depende del peso y, por tanto, del volumen del organismo. La rapidez con que puede ser filtrada depende de la superficie disponible en los riñones. Por eso cada uno está dividido en más de un millón de tubitos, con una longitud total de unas 40 millas (64 Km.) entre los dos.

Así, pues, si multiplicamos por 12 todas nuestras dimensiones lineales, sin hacer ningún otro cambio, nos asfixiaríamos en minutos; porque nuestra superficie pulmonar se multiplicaría por 144, pero la cantidad de materia a oxigenar se multiplicaría por 1.728. Y si sobreviviésemos a eso, nos moriríamos de uremia en pocos días; pues la superficie de los filtros renales se multiplicaría por 144, mientras que el volumen de la sangre a filtrar sería 1.728 veces mayor.

¡No! Un hombre gigantesco, aunque sus fémures se reforzasen y sus pies se extendiesen enormemente para soportar sus toneladas de peso, necesitaría además pulmones y riñones muchísimo más subdivididos y, por añadidura, redes muchísimo más complicadas de vasos sanguíneos y nervios.

¿Y los insectos? Estos se ventilan por tubitos en el abdomen, donde la difusión directa viene a ser suficiente para las necesidades del animal. Si los agrandásemos a tamaño humano, sin modificar por completo su sistema respiratorio, se asfixiarían al instante. No cabe, en verdad, nada tan totalmente indefenso, inofensivo y *muerto,* como esa terrible amenaza de la ficción científica: el insecto gigante.

Consideremos el don más preciado del hombre: su cerebro.

El cerebro humano pesa algo más de 3 libras (1,36 kilogramos) y es uno de los mayores, pero no el mayor.

Un elefante grande puede tener unas 13 libras (unos 6 kilogramos) de cerebro y las mayores ballenas 19 (unos 9 kilogramos). Más importante, sin embargo, es el número de libras de cuerpo que tiene que gobernar cada libra de cerebro.

La relación de masas cuerpo / cerebro vale en el hombre unos 50; es decir, que cada libra de cerebro tiene que gobernar 50 libras de tejidos. La cifra correspondiente para un elegante es 1.000 y para una ballena 10.000.

El mayor dinosaurio tenía una relación de masas cuerpo / cerebro de 100.000.

Aquí, al menos, podríamos creernos en terreno firme y libre de la ley cuadrado-cúbica. Al crecer el tamaño del cuerpo, su peso total variará como el cubo de las dimensiones lineales y lo mismo crece el peso del cerebro.

La relación másica cuerpo / cerebro seguiría siendo 5, aun en los colosos de 70 pies del «Mundo de gigantes».

Pero... las células nerviosas que integran la parte crucial del cerebro, la sustancia gris, están concentradas en la superficie cerebral. Para las supremas funciones del cerebro, según nuestros peculiares prejuicios; para comprender y pensar, lo que cuenta, al cabo, es la extensión superficial del cerebro y no su peso.

Al aumentar la inteligencia, la superficie del cerebro tiene que crecer más de prisa de lo que permite la ley cuadrado-cúbica, y sólo puede hacerlo formando pliegues y circunvoluciones. Para adaptarse a esos pliegues se necesita más cantidad de sustancia gris, que si ésta tapizase con uniformidad la superficie del cerebro.

Por eso la existencia y número de circunvoluciones dan una medida de la inteligencia, y el cerebro humano no sólo es mayor que casi cualquier otro: tiene también más circunvoluciones.

Si hacemos doce veces mayores todas las dimensiones lineales de un hombre y, por tanto, también las de su cerebro, éste conservará suficiente peso en proporción, pero no suficiente superficie. Si no está doce veces más plegado, no podrá seguir gobernando adecuadamente el cuerpo agigantado. Sin ese requisito, el coloso será un perfecto idiota, aunque su cerebro pesara unas 2,8 toneladas.

En suma, el gran tamaño no siempre conviene. Complica enormemente las cosas, en todos los órdenes; y a partir de cierto punto, las ventajas del volumen grande (mejor conservación del calor, ojos mayores y, por tanto, visión más aguda, mayor cerebro y, por

tanto, más inteligencia) empiezan a ser sobrecompensadas por las desventajas de la creciente complicación.

Yo gusto de pensar, con mi habitual prejuicio prohumano, que el tamaño del hombre es el justo.

En los seres marinos, como la gravedad no produce problema de sustentación, es mayor el volumen límite, en que los inconvenientes del tamaño grande empiezan a sobrecompensar a las ventajas. Por eso los seres marinos tienden, en general, a ser mayores que los terrestres y los animales más gigantescos de todos han vivido en el mar, no en tierra.

Pero, ¿y si nos movemos en el otro sentido?

Si reducimos todas las dimensiones de un hombre, ¿no tendría que gobernar menos masa del cuerpo cada unidad de superficie de su cerebro? Si una persona multiplicada por 12, sin otros cambios, resulta idiota, ¿no resultará un supergenio, dividiéndola por 12, sin otra variación?

¡Cuidado! El cerebro de una persona dividida por 12 pesaría 0,03 onzas (0,8.5 gramos). Contendría 6 millones de neuronas, en vez de 10.000 millones, y por muchas circunvoluciones que tenga, y muy diminuto que sea el cuerpo que ha de gobernar, 6 millones de neuronas no pueden articularse en forma lo bastante complicada para albergar inteligencia humana.

En otras palabras, el peso absoluto del cerebro influye también y es fácil poner ejemplos. En algunos de los más pequeños monos, la relación másica cuerpo / cerebro sólo vale 17,5. Si esos monos se ampliasen a tamaño humano, su cerebro pesaría 8,5 libras (5,8 Kg.); y, sin embargo, son menos inteligentes que los gorilas, cuya relación cuerpo / cerebro vale 500. Los cerebros de los monos tienen menos circunvoluciones que el del gorila, y no digamos del nuestro; pero por añadidura no poseen suficientes neuronas.

¡No! Nuestro tamaño es el justo; ni demasiado grande ni demasiado pequeño.

Ahora es muy posible que me creáis caído en renuncio. Hace un par de años fui responsable de una novela que trataba de la drástica reducción de seres humanos, nada menos que al tamaño de bacterias. Ahora pensaréis que entonces no practiqué lo que estoy predicando aquí.

Si así es, os equivocáis totalmente. La drástica reducción de los seres humanos, supuesta posible, entraña una porción de pequeños problemas fascinantes, que procuré tener en cuenta en mi obra y que explicaré en el capítulo siguiente.

3. Contracción increíble

En abril de 1965 me pidieron que convirtiese en novela el guión de una película que estaba entonces rodándose. Se titulaba *Viaje fantástico,* y después ganó un par de «Oscares», por efectos especiales.

He aquí el argumento, en dos palabras. Un submarino y sus cinco tripulantes son reducidos a tamaño microscópico, e inyectados en el torrente sanguíneo de un agonizante, para que desde dentro le hagan una operación en el cerebro, que le salve la vida. Tienen sesenta minutos justos para hacerla; pues transcurrido ese plazo, se pasa el efecto de contracción, y claro que, de seguir dentro del enfermo, al reexpandirse lo matarían.

Naturalmente ocurren toda clase de incidencias adversas que retrasan la operación, y al fin los tripulantes, tras salvarle la vida, salen a tiempo, por unos dos segundos.

Hasta entonces yo nunca había puesto en novela un guión de película, y de todo soy capaz menos de desaprovechar una ocasión de emprender algo nuevo; así que les dejé gustosos que me convencieran.

Leí el guión y dije: «Si hago la novela, tendré que cambiar el final.»

Se alarmaron mucho: «¿Por qué?»

«Verán ustedes —dije—. Al final el barco y el malo son devorados por un leucocito y los otros cuatro se salen, ¿verdad? Pero el barco y el malo quedan dentro.

Yo tendré que sacarlos también.»

«¿Por qué?», preguntaron intrigados.

«Porque el barco y el malo recobrarán su tamaño, y si quedan dentro del paciente lo matan.»

«Pero ¡si el leucocito los ha devorado!», dijeron tras unos momentos de meditación.

«No importa —repliqué—. Los átomos siguen allí, y mientras sigan, aunque estén separados y repartidos por igual...»

No proseguí, porque noté que estaban mirándome boquiabiertos. «Miren ustedes —dije —, yo voy a cambiar el final. Si ustedes no quieren que lo cambie, estupendo: yo no escribo la novela. Si ustedes quieren que la escriba, haré el cambio, y no quiero que Hollywood me lo deshaga. ¿Conformes?»

«Conformes», contestaron, y en mi libro me las ingenié para encontrar un modo de sacar del paciente el leucocito, con el barco y el malo engullidos; y Hollywood no deshizo el cambio. Celebro poder decir que tampoco cambió ni una sola palabra de mi novela.

Pero en la película, el barco seguía quedándose dentro del paciente.

Eso me ocasionó algunas molestias, pues mi obra (como escribo de prisa) salió seis meses antes que la película (ellos ruedan despacio); así que la gente creyó que la película había salido del libro, y no lo contrario.

Los que vieron la película sin haber leído el libro me escribían extrañados del final, y tuve que contestarles con toda paciencia.

Todo el negocio de la «contracción», tan empleada en novela científica, se funda en varias suposiciones indefinibles, como la de que puede ignorarse la ley de conservación de la energía y la de que los átomos no existen.

Supongamos, por ejemplo, que estamos en el tipo de situación que se postula en cuentos científicos tan conocidos como el anticuado de Ray Cumming *La niña en el átomo de oro; o* en el excelente de Henry Hasse, *El que se encogió, o* en la bien lograda película de Richard Matheson, *El hombre increíblemente contraído.*

En estos y otros cuentos, la contracción llega a lo ultramicroscópico; pero nosotros seremos moderados y empezaremos por suponer que un hombre se reduce sólo a la mitad exacta de su estatura. Entonces quedará reducido a la vez a un octavo justo de su volumen inicial (véase el capítulo anterior). Respecto a lo ocurrido, para explicar esa reducción de volumen hay tres posibilidades:

Que los átomos constitutivos de ese cuerpo se hayan hacinado más apretadamente.

Que de cada porción de ese cuerpo hayan desaparecido siete octavas partes de los átomos.

Que se hayan contraído los átomos mismos.

La primera posibilidad nos recuerda el caso de los gases. Un gas corriente puede ser reducido, sin demasiada dificultad, a un octavo de su volumen, con sólo suprimir la mayor parte del espacio entre sus átomos o moléculas.

Mas, aunque en los gases los átomos y moléculas están tan espaciados que es fácil forzarlos a acercarse, en los líquidos y sólidos están en contacto virtual, y sólo pueden ser aproximados muy poco más, aun con enormes presiones. La presión en el centro de Júpiter bastaría para reducir considerablemente el volumen de un hombre, pero no, ni mucho menos, a un octavo del normal. Antes de que eso pudiera ocurrir, se derruiría la propia estructura atómica.

Cierto que, una vez derruida dicha estructura, la contracción puede continuar hasta pequeñísimos volúmenes, cosa que ocurre en el interior de las estrellas. Desgraciadamente los seres humanos encontrarían difícil sobrevivir en esas condiciones, ¿verdad?

Descartemos, pues, la 1.ª posibilidad.

La 2.ª parece mucho más plausible. Basta recorrer el cuerpo humano, reteniendo una molécula de cada ocho y conservando las diferentes clases de moléculas en su justa proporción. (Algo parecido a las encuestas sobre la opinión pública.)

Eso supone que el cuerpo humano puede pasarse con sólo la octava parte de sus moléculas. Cierto que la vida es compatible con muchas menos moléculas de las que poseemos. Los ratones viven, las musarañas también.

Pero ¿y el cerebro? Uno normal tiene una masa de 3 libras (1,36 Kg.). Eliminad siete octavos de todas sus moléculas y sólo le quedará una masa de 6 onzas (170 gramos). Por muy cuidadosamente que conservéis las moléculas cerebrales en sus proporciones apropiadas, un cerebro de 6 onzas nunca bastará para desplegar inteligencia, a nivel humano.

Y aunque me discutáis esto, ¿qué diríais de reducciones muchísimo mayores del cuerpo humano, como las supuestas en todas las ficciones científicas de este tipo?

Descartada, pues, la 2.ª posibilidad.

Nos queda sólo la 3.ª: una contracción de los átomos mismos. De este modo los seres contraídos ni pierden átomos ni los conservan forzados a una mayor concentración. Ellos no notan alteración alguna. Creen sus átomos tan ampliamente espaciados y tan numéricamente complejos como siempre.

Esta tercera posibilidad fue la que declaré explícitamente que admitiría, al poner en novela el guión de *Viaje fantástico.* (La película ignoró todo este asunto.)

Pero aún no estamos libres de apuros. Al encogerse los átomos mismos, ¿qué ocurre con su masa? Hay dos posibilidades:

Que las masas permanezcan invariables.

Que se reduzcan en proporción al volumen.

La primera posibilidad conduce inmediatamente a complicaciones inaceptables. Exigiría que un hombre de 6 pies (1,83 m.) y 200 libras (90 Kg.) se redujese a otro de 3 pies (91 cm.) y 200 libras (90 Kg.). En vez de la densidad aproximada del agua, tomaría la del acero y

seguiría haciéndose más denso, al contraerse más. Cuando tuviese 2 pies (60 cm.) de estatura, sería más denso que el platino, y al adquirir tamaño microscópico, concentraría su masa en tan pequeño volumen, que se hundiría atravesando las rocas de la corteza de la tierra, hasta su centro, como una motita de lo que llamamos «materia degenerada». Descartemos esa posibilidad.

La segunda conservaría del todo inalteradas la complejidad y la densidad humanas. Pero ¿qué se hace del exceso de masa? Que sepamos, el único modo de que desaparezca masa es que se transforme en energía; de suerte que el hombre en contracción sería una superpotente bomba nuclear.

Lo que hice en la versión novelística de *Viaje fantástico* fue acudir a esa segunda posibilidad, estableciendo un vago paralelo con la contracción de una fotografía, por manipulaciones tridimensionales de óptica. El lector podía suponer que, en la desaparición del exceso de masa, había implicado un efecto tetradimensional; esa masa se iba, supongamos, al superespacio, al operarse la contracción, y regresaba de nuevo de él durante la reexpansión.

Claro que eso es fantasía, pero muestra al menos que el problema existe. (En la película la cuestión de la masa quedaba ignorada por completo.)

En el cine, como en la novela, el submarino viene a reducirse al tamaño de una bacteria grande, antes de inyectarlo en el torrente sanguíneo; así que los seres humanos a bordo pueden tener 1/100.000 cm. de altura (ó 1/250.000 pulgadas, si se prefiere).

Según eso, si al principio tenían estatura normal, todas sus dimensiones se habrán reducido a 1/17.000.000 de lo que eran. Ellos, con sus átomos contraídos y su masa disminuida, se creerían de tamaño del todo corriente e igual encontrarían el submarino; mientras que fuera de él, todas las dimensiones del Universo les parecerán multiplicadas por 17 millones.

Por tanto, los vasos sanguíneos son tubos enormes; los leucocitos son lo bastante grandes para engullirse sin violencia el submarino entero, etc. Hasta aquí va bien el cuadro; pero ¿y los átomos mismos?

Un átomo mide 1/100.000.000 cm. de diámetro. Multiplicando sus líneas por 17 millones, queda un diámetro de 1/6 de cm. Como los gases importantes de la atmósfera (oxígeno y nitrógeno) están formados de moléculas de dos átomos cada una, las moléculas del aire exterior, no contraído, les parecerán a los viajeros elipsoides de 1/3 de cm. de eje mayor.

Es decir, que los átomos y moléculas no contraídos serán bastante grandes para ser vistos por los supuestos tripulantes. Sin embargo, la película no tiene esto en cuenta.

En cierto momento el submarino tiene escasez de aire, y para rellenar sus tanques inserta un tubo en los pulmones del paciente. Pero la boca del tubo tiene apenas mayor diámetro que las moléculas de aire de los pulmones del enfermo. ¿Se imaginan ustedes lo que se tardaría en extraer aire por el tubo en esas condiciones?

La más ínfima pitera de un neumático daría mucha más corriente. Y peor aún: una vez lleno el submarino de aire sin contraer, ¿cómo elevar esas enormes moléculas, narices arriba, hasta nuestros pulmones contraídos? ¿Y qué harían con ellas los glóbulos rojos contraídos de nuestros pulmones?

Esto no se me ocurrió hasta después de terminada la novela y tuve que releerla, sudando de apuro, y revisar varias páginas. Tuve que introducir un artificio, que contraía parte del aire de los pulmones del paciente, *antes* de absorberlo por el tubo hasta el barco.

Otro problema. Los tripulantes del submarino microscópico comunicaban por radio con el mundo exterior.

Pero esa radio estaba contraída y la longitud de las ondas que emitía era sólo 1/17.000.000 de la normal antes de la contracción. La radio emitía ondas luminosas.

Al operador a bordo del submarino le parecerían ondas radio, pero para los hombres del mundo, no contraído serían diminutos relámpagos de luz, y resultaría arduo utilizarlas para la radiocomunicación.

Y ¿cómo verían los del submarino? ¿Por las ondas de luz producidas por sus contraídas fuentes luminosas?

Pero para el mundo exterior esas ondas serían rayos gamma; por ejemplo, también para el paciente, en cuyo torrente sanguíneo navegan. Espero que no llegarían a perjudicarle, pero no me he molestado en hacer cálculos.

Dejé pasar estos detalles de las radiaciones, porque, repito, se me ocurrieron demasiado tarde y fui demasiado perezoso para suponer que nadie los captaría. Pero claro que subestimé a mis lectores. Un joven sagaz se dio cuenta y arremetió inmediatamente contra mí.

Tuve que contestarle, confesando mis culpas [0].

Los autores de la película suponían a la protagonista, Raquel Welch, atacada por anticuerpos; pero no tenían ni la menor idea de la traza que presentaría un anticuerpo, debidamente aumentado. Claro que, ¡cualquiera estudia los anticuerpos, teniendo a Miss Welch en la pantalla!

Los anticuerpos son, naturalmente, moléculas de proteínas y yo me las imaginé como pequeños copos brillantes, de algodón, de unas dos pulgadas de anchura, a la escala del mundo diminuto. Además tenía que representarlos como copos de algodón, porque los enlaces del hidrógeno que sujetaban en su sitio las cadenas peptídicas debían ser bien flexibles y elásticos.

Los de la película olvidaron también que las finas membranas celulares no tendrían nada de finas para los seres diminutos. En cierto momento, uno de ellos tiene que abrirse paso del tubo capilar al pulmón. En la película eso no era problema. Basta perforar las membranas de separación, finas como el papel; como que su espesor vale sólo 1/10.000 de pulgada.

Cierto, pero en la escala de los diminutos ese espesor sería de unas 40 yardas (36,3 metros). El argumento exigía que el protagonista lo atravesase, y yo pensé que 40 yardas era un poco demasiado. Hice trampa, conformándome con decir «varias yardas» en el libro, y así quedó.

Es más, falta el asunto de la tensión superficial. *En el seno de un líquido,* cada molécula es ligeramente atraída por todas las demás. Las atracciones solicitan en todos los sentidos y se compensan entre sí, de modo que cada molécula se mueve libremente, como si no fuese atraída en absoluto.

Pero *en la superficie del líquido,* cada molécula es atraída por las interiores del líquido. Las escasas moléculas externas, de aire, de fuera del líquido, apenas producen efecto.

Las moléculas superficiales experimentan, pues, una atracción de conjunto hacia dentro y hay que gastar energía para que se mantengan en la superficie. Por ese motivo la superficie tiende a encogerse todo lo posible; y por eso toman forma esférica las pequeñas gotas líquidas que flotan libremente. La esfera tiene superficie mínima respecto a su volumen. (Las gotas grandes toman «forma de lágrima», por la resistencia del aire.)

Es más, como todas las moléculas superficiales empujan hacia dentro cuanto pueden, pugnan, por decirlo así, por aglomerarse, como la gente cuando intenta asaltar un vagón del metro abarrotado, a las «horas punta». Separar esas moléculas, así aglomeradas, cuesta más energía que separar las moléculas corrientes de lo interior del líquido. Ese exceso de mutua adherencia de las moléculas superficiales se llama «tensión superficial», porque es como si el líquido estuviese envuelto en una sutil membrana tensa.

---

[0] Después de aparecer este artículo he recibido varias cartas señalando otros sutiles reparos relativos a las fuerzas eléctricas, en las cuales las grandes contracciones introducen antinomias insolubles.

Algunos objetos diminutos no pesan bastante para romper esa membrana y hay insectos que se deslizan, como andando, por la superficie del agua; no porque floten (si los sumergiésemos en el líquido no saldrían a flote), sino porque se apoyan en la «membrana» que ejerce la tensión superficial.

Ahora bien, si hay insectos bastante ligeros para ser sostenidos por la tensión superficial, ¿qué harán los microscópicos seres de nuestra fábula. No me he atrevido a calcular lo que debe parecerles a ellos la tensión superficial de los líquidos no contraídos. Sospecho que sería tan grande, que les impediría en absoluto atravesar la superficie de la sangre líquida, para pasar al aire del pulmón.

Las necesidades del argumento de la película me obligaron a dejarles pasar, pero se lo puse difícil. Hasta ahora, nadie me ha escrito afirmando que la tensión superficial sea un obstáculo insuperable.

Para explicar un último punto retrocedamos al siglo XIX, cuando por cierto había grandes científicos que no creían en la existencia de los átomos; pero no por beatífica ignorancia, como la gente de Hollywood, sino por sesudos razonamientos.

La teoría atómica, en su forma moderna, había sido propuesta en 1803 por el químico inglés Juan Dalton, como manera sencilla de explicar diversos fenómenos químicos. En todo el siglo xix el concepto de átomo explicó, cada vez con más éxito, lo que ocurría en los tubos de ensayo. Al final del siglo los químicos hasta hacían uso de «fórmulas estructurales» para las moléculas más complicadas. No sólo contaban el número de átomos de diferente clase de cada molécula; hasta situaban esos átomos en ordenaciones específicas tridimensionales, como ciertos rompecabezas.

Naturalmente los químicos se veían casi forzados a creer que los átomos existen. Si no existiesen, ¿cómo podría su pretendida existencia explicar tantas cosas con tanta sencillez? ¿Por qué habría de comportarse la materia, en tantos sentidos y tan enteramente *como si fuera atómica,* no siéndolo en realidad?

Sin embargo, algunos químicos sostenían que no era prudente salirse de los fenómenos mensurables. Todo el conocimiento decimonónico de los átomos era indirecto.

Eran demasiado pequeños para ser vistos ni percibidos por ningún medio directo, y aunque podían resultar muy útiles como modelos para fijar las ideas, se temía que pudiesen desorientar a los científicos demasiado prestos a creer en su existencia efectiva.

El último gran científico que razonaba de esa manera, el último en rechazar la existencia efectiva de los átomos, fue el físico-químico Guillermo Ostwald. A principios del siglo xx, aún seguía Ostwald sosteniendo apasionadamente la tesis antiatómica. Pero al fin cambió de opinión, he aquí por qué.

Comencemos en 1827, en que el botánico escocés Robert Brown, que se interesaba por el polen, estaba una vez estudiando al microscopio, con poco aumento, una suspensión de granos de polen en agua. Encontraba difícil enfocar, porque los granos temblaban. No se movían sistemáticamente en determinada dirección; oscilaban al azar por todo el campo. Recordó Brown que los granos del polen tenían vida, aunque latente, y creyó que esa vida se manifestaba, en cierto modo, en el movimiento.

Examinó, sin embargo, partículas de colorante, indudablemente inanimadas, de parecido tamaño, suspendidas en agua, y también oscilaban de un modo errático. Cualquier suspensión oscilaba, si era lo bastante menuda, y cuanto más menuda, más marcadas eran sus oscilaciones.

Lo único que se podía hacer en aquella época era darle nombre al fenómeno, pues explicación no tenía. Lo había descubierto Brown y consistía en movimientos erráticos de las partículas. ¿Por qué, pues, no llamarle movimiento browniano?

Por los años 1860, el físico escocés James Clerk Maxwell propuso una impresionante explicación de las propiedades de los gases, a base de partículas moviéndose al azar; y por vez primera la teoría atómica explicó fenómenos físicos, además de los químicos. En seguida surgió la sospecha de que las partículas del líquido, al moverse al azar, podrían empujar en uno y otro sentido a las partículas más gruesas en suspensión.

En suma, los granos de polen o de tinte estaban siendo bombardeados por las moléculas de agua, y acaso eso era lo que producía el movimiento browniano.

Miradlo de otra manera: Nosotros mismos estamos siendo bombardeados por todas partes, por moléculas de aire; o de agua, si estamos en el agua. Pero en cualquier instante nos alcanzan en enormes números, viniendo de todas direcciones, y sus efectos se compensan. No nos empujan más en un sentido que en el opuesto. Podrá suceder que vengan unas pocas más del Este que del Oeste, pero cada molécula es tan diminuta que el efecto de sólo unas pocas, entre el astronómico número total, es infinitamente pequeño. Claro que si nos llegasen *muchas más* del Este que del Oeste sentiríamos el empujón; pero en el movimiento perfectamente casual de las moléculas, la probabilidad de que nos lleguen del Este *muchas más* es infinitamente pequeña también.

Mas consideremos nuestros hombres en contracción (u otras cosas cualesquiera). Desde su punto de vista, el Universo está agrandándose y las moléculas de aire y de agua también. Al encogerse, ellos presentan un blanco menor al bombardeo molecular y les alcanzan menos moléculas en cada instante. Además cada molécula va pareciéndoles cada vez mayor.

Cuando nuestros seres se hacen microscópicos están bombardeados por grandes proyectiles, pero en pequeño número. El que lleguen entonces unos pocos más del Este que del Oeste será importante, y los minúsculos seres lo sentirán. Si predominan los del Este los moverán hacia el Oeste, y si un instante después predominan los de arriba, los moverán hacia abajo, etc.

El bombardeo casual por moléculas explica, en primer lugar, el movimiento; en segundo, el carácter errático del mismo, y en tercero, el hecho de que el efecto sea tanto más pronunciado cuanto menor el cuerpo flotante.

Hombres como Ostwald no se impresionaron por este razonamiento; esto era palabrería. Para que fuese algo más, había que calcular las probabilidades de desequilibrio en el bombardeo molecular y la magnitud de sus efectos. En suma, era menester un análisis matemático exacto y riguroso del efecto browniano, que lo explicase *cuantitativamente,* en función del bombardeo casual de las moléculas.

En 1905 se realizó al fin ese análisis, y nada menos que por Alberto Einstein.

Según su fórmula, las partículas suspendidas en un vaso alto de líquido deben reflejar, en su distribución, el equilibrio entre la fuerza de la gravedad y el efecto del movimiento browniano.

La gravedad tira hacia abajo y los movimientos moleculares empujan en todas direcciones, incluso hacia arriba.

Si actuase sólo la gravedad, todas las partículas se posarían en el fondo. Si sólo actuase el movimiento browniano, se esparcirían con uniformidad. Bajo la acción de ambos se esparcirán, concentrándose hacia el fondo cada vez con más densidad. Cuanto más pesadas las moléculas, mayor será el movimiento browniano de partículas de tamaño fijo y a temperatura constante, y en menor medida se acumularán éstas hacia el fondo.

Pero Einstein era sólo un teórico. Se conformó con obtener la ecuación y dejó a otros el contrastarla con fenómenos observables. El que lo hizo fue el físico francés Juan Bautista Perrin. En 1908 suspendió en agua granitos de resina de goma y contó el número de granos a distintos niveles. Halló que ese número crecía hacia abajo, de exacto acuerdo con la ecuación de Einstein, con tal de atribuirles una cierta masa a las moléculas de agua.

No sólo comprobó la explicación einsteiniana del movimiento browniano, sino que fue el primero que efectuó una medida razonablemente aproximada del peso real de moléculas sueltas.

Ostwald se enfrentó entonces con un efecto observable, producido por moléculas individuales. Al contemplar la vibración de los granos suspendidos en agua, los veía, en efecto, empujados por moléculas sueltas. Esto satisfacía su rigurosa exigencia de efectos directamente observables y ya no pudo seguir negando la existencia de los átomos.

Perrin recibió por su trabajo el premio Nóbel de Física en 1926. (Einstein había recibido el suyo en 1921, por otros méritos.)

Esto nos lleva de nuevo al *Viaje fantástico.* En la película, el submarino microscópico surca la corriente sanguínea, exactamente como uno de tamaño normal que navegase en una corriente oceánica. Así ocurriría si no hubiese átomos, o si fuesen infinitamente pequeños.

Pero *hay* átomos de tamaño comparable al del microscópico sumergible. Por tanto, éste debe ir desviándose a derecha e izquierda, adelante y atrás, abajo y arriba, por efecto del movimiento browniano. Y más aún, se desviarían los tripulantes, en las ocasiones en que salen del barco, para nadar en el torrente sanguíneo.

En realidad yo no pude tener muy presentes tales movimientos en mi novela. Hubiesen introducido demasiadas complicaciones (empezando por terribles mareos).

Pero los mencioné y supuse algo de oscilación al partir, sólo para mostrar que la había, y luego la ignoré.

Todo esto puede producir desaliento y alarma en el corazón de algunos de mis amables lectores, que hayan sentido gana de escribir ficción científica, y que ahora pensarán que hacerlo exige estudios superiores de ciencias. No lo crean ni un momento. La buena ficción científica no requiere necesariamente todos estos escrúpulos.

La película *Viaje fantástico,* con todos sus errores, inconsecuencias y descuidos, me pareció la mar de divertida, llena de interés, movidísima y deliciosa. Los errores no me molestaron ni pizca, mientras estaba viéndola.

Es más, si algún otro hubiese escrito una novela basada en ella, sin preocuparse de corregir ninguno de sus errores, probablemente hubiese resultado también un libro espléndido.

Pero es que yo, por mi parte, sabía que los errores estaban allí y tenía que corregirlos. Es mi modo personal de escribir ficción científica y no es el único. La franqueza me obliga a declarar que yo considero mi manera la mejor; pero claro que hay otras.

4. Pares y nones

Acaba de ocurrirme algo desconcertante. De ordinario me resulta poco difícil hallar asunto para estos capítulos. Se me ocurre un tema interesante y en seguida trazo una determinada línea de desarrollo, desde un cierto principio a un cierto fin, y ya estoy en marcha.

Mas hoy, habiendo decidido tratar de la asimetría (en más de un capítulo, probablemente), y terminar en la vida y la anti-vida, sucedió que se me ocurrieron dos posibles modos de empezar. De ordinario en ese caso, uno de ellos me parece tan preferible al otro, que lo elijo tras bien corta duda.

Pero esta vez, la cuestión era si partiría de los números impares o de la doble refracción, y los motivos para lo uno o lo otro que bullían en mi cabeza estaban tan equilibrados, que no pude decidirme. Dos horas pasé ante mi mesa, comparando ambas posibilidades, con creciente mal humor.

Me di cuenta, por cierto, de la desagradable semejanza de mi caso con el del asno de Buridan.

Me refiero a un tal Buridan, filósofo francés del siglo XIV, quien dicen que afirmó lo siguiente: un asno hambriento, puesto entre dos sacos de pienso exactamente iguales en todo, se morirá de hambre, porque no verá motivo para decidirse por uno, y no por el otro.

En realidad, es claro que hay aquí un sofisma, pues la afirmación no tiene en cuenta el factor azar. El burro, que no es un lógico, pondrá casualmente la cabeza de modo que vea uno de los sacos mejor que el otro; torcerá casualmente las patas, de modo que un saco le quede más cerca, e irá a parar al saco mejor visto, o más próximo.

De antemano no podemos decir cuál de los dos sacos será. Si pusiésemos mil asnos entre sendos pares de sacos exactamente idénticos, sería de esperar que una mitad de los jumentos se volverían hacia la derecha y la otra hacia la izquierda. Pero la conducta de cada animal seguirá siendo impredecible.

Del mismo modo, es imposible predecir si una honrada moneda, honradamente lanzada, caerá en un cierto caso en *cara* o en *cruz;* pero podemos predecir con confianza que un gran número de monedas, lanzadas simultáneamente, o una misma moneda lanzada muchas veces, nos darán cara (o cruz), aproximadamente en la mitad de los casos.

Y por eso, aunque la probabilidad de las «caras» es exactamente igual a la de las «cruces», ello no nos impide llamar al azar en nuestra ayuda, al tomar una decisión, lanzando una sola vez una moneda.

¿Empezamos por los números pares, amable lector?

Sospecho que algún filósofo prehistórico sería quien decretó que hay dos clases de números: los pacíficos y los belicosos. Los pacíficos eran los del tipo 2, 4, 6, 8; mientras que los intermedios eran los belicosos.

Si tenemos ocho hachas de piedra y hay dos individuos con igual derecho, será fácil darle cuatro a cada uno, y en paz. Pero si las hachas son siete, habrá que darle tres a cada uno, y luego, o tirar la restante, con clara pérdida de un valioso objeto, o hacer que los disputantes riñan por ella.

Que la cualidad primitiva que caracterizó a los números que llamamos pares y nones, venía a ser de esa índole, está indicado por los mismos nombres que les damos.

La palabra «par» sugiere fundamentalmente regularidad y lisura, sin desigualdades imprevistas *. Un número par de monedas idénticas, por ejemplo, puede repartirse en dos pilas de altura exactamente igual.

Las pilas «emparejan» en altura, y por eso se llama par el número. Par el número que tiene la propiedad de repartirse con igualdad.

Por el contrario, «non» == no, niega esa posibilidad. Si repartimos un número «non» de monedas en dos pilas, lo más iguales posible, una de ellas se alzará sobre la otra la altura de una moneda. Los números nones poseen la propiedad de partirse desigualmente; y también su otro nombre «impares» afirma la falta de igualdad del reparto.

Por eso, por permitir igualdad de reparto, se dice que los números pares tienen *paridad,* de una palabra latina que significa igual. Inicialmente se aplicaba esta palabra sólo a los números pares, como exige la lógica; pero los matemáticos hallaron cómodo decir que dos números, ambos pares o ambos nones, eran en los dos casos de «igual *paridad».* Uno par y uno impar son, en cambio, «de paridad diferente». Para apreciar las ventajas de este convenio, consideremos que:

Si se suman dos números pares, la suma es siempre que dos pares pueden escribirse *2m y 2n,* en que *m* y *n* son números enteros; y la suma *2m + 2n* sigue siendo claramente divisible por 2. Pero usted y yo somos amigos, y estoy seguro de que puedo excusar el razonamiento matemático, porque le encontraré a usted dispuesto a aceptar mi palabra de honor y de caballero, en estas materias. Además, busque usted enhorabuena dos pares cuya suma no sea par.

Si se suman dos números impares, la suma es también infaliblemente par.

Mas si sumamos un par con un impar, el resultado es infaliblemente impar.

Expresemos esto, más abreviadamente, en símbolos, designando por P el par y por *N* el non:

P + P = P

N + N = P

P + N = N

N + P = N

Si nos referimos sólo a parejas de sumandos, el concepto de *paridad* nos permite decir esto en dos proposiciones, en vez de cuatro:

Paridades iguales dan suma par.

Paridades distintas la dan non.

Esto es muy parecido a lo que sucede con el producto, si puede haber factores positivos (+) y negativos (—). El producto de dos positivos es siempre positivo. El de dos negativos, también siempre positivo.

El de uno positivo por uno negativo, siempre negativo.

Usando símbolos:

+ X + = +

- X - = +

+ X - = -

- X + = -

O si consideramos que los positivos tienen una **cierta** paridad, y los negativos la opuesta, podemos decir respecto a productos de *dos* factores:

Paridades iguales dan producto positivo.

---

* Esa acepción de la palabra «even» no lo tiene nuestro vocablo «par».—(N. del T.)

Paridades opuestas lo dan negativo.

El concepto de paridad, es decir, la agrupación de todos los objetos de una cierta clase en dos subclases, y el hallar resultados opuestos, según operemos con objetos de la misma o de distinta subclase, es aplicable a fenómenos físicos.

Por ejemplo, todas las partículas electrizadas pueden dividirse en dos clases; con carga positiva y con carga negativa. También todos los imanes poseen dos puntos de magnetismo concentrado, de propiedades opuestas:

un polo Norte y uno Sur. Designémoslos, pues, por

+, -, N y S.

Resulta que

+ con + o N con N = repulsión

- con - o S con S = repulsión

+ con - o N con S = atracción

- con + o S con N = atracción

También aquí podemos formular dos proposiciones:

Cargas eléctricas o polos magnéticos iguales se repelen.

Cargas o polos opuestos se atraen.

La analogía formal con la suma o el producto de «pares» e «impares» es obvia.

Cuando, entre entes cualesquiera, paridades iguales dan siempre un resultado y paridades distintas dan siempre el opuesto, diremos que «se conserva la paridad». Si algunas veces dos pares diesen suma impar; o si un número positivo, multiplicado por uno negativo diese producto positivo; o si un polo magnético Norte repeliese a uno Sur, diríamos que se «quebrantaba la ley de conservación de la paridad».

Cierto que entre números y entre cargas eléctricas o magnéticas nadie ha observado jamás que falle la «ley de conservación de la paridad», ni espera en serio observarlo en el futuro.

Pero, ¿y en otros casos?

Veréis: El electromagnetismo constituye un «campo»; es decir, toda carga eléctrica o magnética está rodeada de un espacio, dentro del cual se manifiestan sus acciones sobre otras cargas de la misma naturaleza. Por eso se habla de una «interacción electromagnética», entre pares de objetos que poseen cargas eléctricas o polos magnéticos.

Hasta los primeros años del siglo XX, la única interacción distinta era la gravitatoria.

A primera vista nos parece fácil introducir la paridad en la gravitación. No hay modo de dividir los objetos en dos grupos de propiedades gravitatorias opuestas.

Todos los objetos de una masa determinada poseen la misma intensidad de interacción gravitatoria de la misma clase. Dos objetos cualquiera con masa se atraen. No parece existir la «repulsión gravitatoria» (y según la teoría general de la gravitación de Einstein, no puede haber tal cosa). Es como si en gravitación, sólo pudiera decirse P+P=P, o +X+=+.

Cierto que es posible que en el campo de la física subatómica haya objetos con masa que posean las propiedades gravitatorias corrientes; y otros objetos con masa que posean propiedades gravitatorias de naturaleza opuesta (antigravedad). En ese caso, lo probable sería que dos objetos *antigrávidos* se atrajesen, como dos grávidos; pero que uno grávido y otro antigrávido se repeliesen.

La situación sería opuesta a la del caso electromagnético (atracción entre grávidos iguales y repulsión entre grávidos opuestos); pero fuera de esa inversión, seguiría conservándose la paridad.

Pero lo malo es que la interacción gravitatoria es tan insignificante frente a la electromagnética, que hasta ahora resulta imposible medir la acción gravitatoria entre los corpúsculos subatómicos, ni distinguir si es atractiva o repulsiva. Así, pues, la cuestión de la paridad del campo gravitatorio queda pendiente.

Al avanzar el siglo xx, se reconoció que las interacciones gravitatorias y electromagnéticas no son las únicas que existen. Las partículas subatómicas ejercían otras.

Cierto que los electrones, con su carga negativa, y los protones, con su carga positiva, se sujetaban a las leyes del electromagnetismo. Pero en el mundo subatómico había otros fenómenos que no obedecían a ellas. Había, por ejemplo, una cierta interacción entre partículas, cargadas o no, que se manifestaba sólo a las distancias ínfimas, que se encuentran dentro del núcleo atómico.

Esta interacción nuclear ¿muestra paridad?

Toda partícula subatómica tiene una cierta propiedad mecano-cuántica, que puede expresarse en función de tres cantidades *x, y* y *z.* En algunos casos es posible cambiar el signo de las tres, sin que se altere el signo de la expresión en conjunto. Las partículas en que se verifica eso se dice que tienen *paridad par.* En otros casos, al cambiar de signo *x, y* y *z, cambia* el de la expresión, y la partícula en que ocurre eso se dice que tiene *paridad impar.*

¿Por qué par e impar? Pues bien, una partícula de paridad par puede partirse en dos de *paridad par,* o en dos de *paridad impar,* pero nunca en una de paridad par y otra de paridad impar. Por su parte, una partícula *impar* puede escindirse en una par y otra impar, pero nunca en dos partículas pares o en dos impares. Esto es análogo a cómo un número par puede descomponerse en suma de dos pares o dos impares, pero nunca en suma de un par con un impar; mientras que un número impar se descompone en suma de un par con un impar, pero nunca en suma de dos pares o dos impares.

Mas he aquí que se descubrió la partícula llamada «mesón K». Era inestable y en seguida se dividía en dos «mesones pi». Algunos mesones K no daban dos «mesones pi», sino tres, al dividirse, y esto era bien desconcertante. Si un mesón K hacía lo uno, no debiera poder hacer lo otro. Así un número par puede ser suma de dos impares (10 = 3 + 7) y un número impar suma de tres impares (11=3+7+1); pero no hay número que sea unas veces suma de dos impares, y otras veces de tres. Eso sería como esperar que un número fuese a la vez par e impar. En una palabra, representaría quebrantar la ley de conservación de la paridad.

Los físicos, por tanto, pensaron que tenía que haber dos clases de mesones K: el de *paridad par* (mesón theta), que se dividía en dos mesones pi; y el de *paridad impar* (mesón tau), que se dividía en tres mesones pi.

Esa solución no resultó del todo satisfactoria, pues no parecía posible distinguir entre el mesón theta y el mesón tau, fuera del número de mesones pi en que se descomponía. Inventar una diferencia de paridad entre dos partículas, idénticas en todo lo demás, parecía un sistema poco afortunado.

Hacia 1956 unos cuantos físicos habían comenzado a sospechar que quizá fuese posible que falle en ciertos casos la ley de conservación de la paridad. Entonces ya no sería necesario distinguir entre el mesón theta y el mesón tau.

Esa idea despertó el interés de dos jóvenes físicos chino-americanos de la Universidad de Columbia: Chen Ning Yang y Tsung Dao Lee, que tuvieron en cuenta lo siguiente:

Es un hecho reconocido que no hay más que dos interacciones nucleares: la que mantiene ligados los protones y los neutrones en el núcleo es sumamente fuerte, unas 130 veces mayor que la interacción electromagnética. Por eso se llama la «interacción nuclear fuerte».

Hay una segunda «interacción nuclear débil», que sólo vale la cienbillonésima parte de la fuerte, pero todavía es como un millón de trillones más intensa que la inconcebiblemente pequeña interacción gravitatoria.

Esto significaba que había cuatro tipos de interacción en el Universo (y hay ciertos motivos teóricos para creer que no puede existir un quinto tipo, aunque yo me guardaré de responder de ello). 1.° Nuclear fuerte; 2.° electromagnético; 3.° nuclear débil, y 4.° gravitatorio.

De la acción gravitatoria podéis prescindir por los motivos ya expuestos. De las otras tres, en 1956 estaba bien establecido que la nuclear fuerte y la electromagnética conservan la paridad. Se conocían numerosos casos de tal conservación y el asunto parecía dirimido.

Pero nadie había estudiado nunca sistemáticamente la interacción nuclear débil, respecto a su paridad; y la ruptura del mesón K entrañaba una interacción nuclear débil. Desde luego, todos los físicos suponían que la paridad se conservaba en dicha interacción, pero era sólo un supuesto.

Yang y Lee publicaron un artículo indicando esto, y proponiendo experimentos para comprobar si las interacciones nucleares débiles conservan la paridad o no. Tales experimentos fueron prontamente realizados, y la suposición de Yang-Lee de que no se conservaría la paridad se demostró que era acertada. Poco tardó en concedérsele participación en el premio Nóbel de física de 1957, contando Yang treinta y cuatro años y Lee treinta y uno.

Claro que podríais preguntarme por qué ha de conservarse la paridad en ciertas interacciones y no en otras; y que podríais no contentaros con la respuesta: «Porque el Universo es así.»

En verdad, fijándose demasiado en los casos en que la paridad se conserva, se puede adquirir la idea de que es imposible, inconcebible, incomprensible, encontrar casos en que no se conserve. Si luego se demuestra que en ciertos casos no rige la conservación de la paridad, nos parece que eso es una tremenda revolución, que sume toda la estructura de la ciencia en un estado de colapso.

Pero nada de eso.

La paridad no es una característica tan esencial de todo lo que existe que tenga que conservarse en todas partes y en todos los momentos y condiciones. ¿Por qué no ha de haber circunstancias en que no se conserve, como en el caso de la interacción gravitatoria, en que podría no existir siquiera?

Es también importante comprender que el descubrimiento del hecho de que la paridad no se conserva en las interacciones nucleares débiles no «echa abajo» la ley de conservación de la paridad, aunque así lo dijeron los periódicos y hasta algunos científicos. La ley de conservación de la paridad subsistió y sigue en pleno vigor, en aquellos casos en que su validez estaba acreditada por los experimentos.

En cambio, afecta sólo a las interacciones nucleares débiles, en que la conservación de la paridad nunca se había puesto a prueba antes de 1956, pero se había supuesto válida, un tanto gratuitamente. El experimento final se limitó a demostrar que los físicos habían hecho una suposición, sin verdadero derecho a hacerla; y la ley de conservación de la paridad sólo resultó derogada donde nunca se había demostrado que rigiese.

Acaso sea útil que presentemos un caso familiar, de experiencia diaria, en que rige la conservación de la paridad; y luego otro, en que, por analogía, la suponemos válida sin serlo. Comprenderemos así lo que pasó en la física, y cómo el echar abajo una ley que en realidad no estaba vigente fortalece la estructura de la ciencia, en vez de dañarla.

Los seres humanos son de dos clases: varones (V) y mujeres (M). Ni dos varones por sí, ni dos mujeres pueden tener hijos (H). Pero un hombre y una mujer pueden tenerlos. Escribiremos, pues:

V y V = no H

M y M = no H

V y M = H

M y V = H

He aquí, pues, la familiar situación de paridad:

Sexos iguales no dan hijos.

Sexos opuestos pueden darlos.

Claro que hay individuos sexualmente inmaduros, mujeres estériles y hombres impotentes, etc.; pero eso son detalles que no alteran la situación general. En cuanto a los sexos y los hijos, podemos decir que la especie humana —y ciertamente otras muchas— conserva la paridad.

Por conservar la especie humana la paridad sexual, respecto al nacimiento de los hijos, es fácil *presuponer* que la conservará también respecto al amor, de suerte que se concibe la idea de que el amor sexual debe existir sólo entre hombre y mujer. Sin embargo, lo cierto es que, en ese aspecto, no se conserva la paridad; que la homosexualidad masculina y femenina existen y han existido siempre. La suposición de que debía conservarse la paridad donde en realidad no se conserva ha hecho que mucha gente encuentre la homosexualidad inmoral, perversa, aborrecible, y ha creado mares de dolor a través de la historia.

Además, en las culturas occidentales la institución del matrimonio está íntimamente relacionada con la descendencia, y por tanto observa estrictamente la ley de conservación de la paridad, que rige para el nacimiento de hijos. El matrimonio sólo pueden contraerlo un hombre y una mujer, porque, idealmente, es el sistema más sencillo que hace posible tener descendencia.

Ahora, sin embargo, hay una creciente comprensión de que la paridad, que se conserva rígidamente respecto a la descendencia, no se conserva necesariamente respecto a las inclinaciones sexuales. Cada vez se va tratando la homosexualidad no como un pecado o un crimen, sino como una desgracia.

. En nuestra sociedad va lentamente madurando la convicción de que las inclinaciones sexuales no están sujetas todas al rígido imperativo de la conservación de paridad.

La anticuada institución de la poligamia es un ejemplo de una especie de matrimonio, gozada por muchos de los hombres dignos del Antiguo Testamento, en la que no se conservaba la paridad sexual.

En el capítulo siguiente explicaremos la naturaleza del experimento que estableció la no conservación de la paridad en la interacción nuclear débil, y estudiaremos lo que ocurrió después.

5. El electrón es zurdo

Ayer recibí una carta censurando mi estilo. «Usted evita lo poético —se quejaba— hasta el extremo de que cuando se le ocurre una frase sibilina, brillante, sintética, yo apostaría a que usted la deja deliberadamente a un lado, opta por una más clara pero más pedestre.»

«Cierto que lo hago —respondo yo—. Puede usted apostarse hasta la vida.»

Como seguramente saben cuantos leen mis tomos de ensayos científicos, me desagrada el concepto místico del Universo, en nombre de la ciencia, la filosofía o la religión. También me desagrada el concepto místico de la literatura.

No niego que sea posible suscitar una reacción emocional por medio de una frase sibilina, brillante, sintética; pero si usted me enseña una frase sibilina, yo le enseñaré a usted un gran número de lectores que, no sabiendo lo que significa, pero temerosos de revelar su ignorancia, dirán: «¡Oh, qué poético y emocionante es esto!»

Puede que lo sea, y puede que no; pero multitud de ineptos literarios salen adelante por la inseguridad intelectual de sus lectores; y montones de plumíferos escriben grandes fárragos de mala «poesía» y viven de ello.

Yo, por mi parte, me las arreglo para conservar un alto nivel de seguridad intelectual. Cuando leo una obra destinada, al parecer, al gran público, y veo que no le encuentro pies ni cabeza, nunca se me ocurre atribuirlo a que me falta inteligencia. Llegó más bien a la conclusión de que el autor es un literato mediocre, o un pensador confuso, o, lo más probable, las dos cosas.

Con estas opiniones no es de extrañar que en mis propios escritos opte «por un estilo más claro, aunque más pedestre».

Por un lado, mi objeto y *mi pasión,* aun en mis novelas, es explicar. En parte es por instinto misionero por lo que anhelo conseguir que mis lectores vean y entiendan el Universo, como yo lo veo y entiendo, para que puedan gozarlo como yo. Lo hago en parte también porque el esfuerzo de llevar las ideas al papel, con suficiente claridad para que el lector las entienda, me hace a mí entenderlas también.

Yo intento enseñar porque, consiga o no instruir a otros, consigo infaliblemente instruirme a mí mismo.

He de admitir, sin embargo, que algunas veces esa tarea de enseñanza que me impongo presenta especial dificultad. Proseguir la exposición sobre la paridad y asuntos afines, iniciada en el capítulo anterior, va a resultar de lo más ingrato; pero al fin nadie me ha prometido senderos de rosas; conque adelante.

Las leyes de conservación son las generalizaciones fundamentales de la física, y de los aspectos físicos de todas las demás ciencias. En general, una ley de conservación dice que cierta propiedad especial, medida en todas partes de un «sistema cerrado», o sea, que no está en interacción con ninguna otra parte del Universo, permanece constante, con independencia de los cambios que ocurran dentro del sistema. Por ejemplo, la cantidad total de energía de un sistema cerrado es siempre la misma, sean cuales fueran los cambios dentro del sistema; y a esto se le llama la «ley de conservación de la energía».

Esta ley es de gran utilidad para los físicos y es probablemente la ley de conservación más importante, y por tanto la ley de cualquier clase más importante de la ciencia toda. Sin embargo, no parece llevar en sí un carácter de abrumadora evidencia.

¿Por qué ha de conservarse la energía? ¿Por qué no ha de crecer o disminuir, a veces, la energía de un sistema cerrado?

En realidad no podemos concebir el motivo, pensando sólo en la energía. Tenemos que aceptar sencillamente la ley, porque se conforma con las observaciones.

Pero las leyes de conservación parecen vinculadas a simetrías del Universo. Puede demostrarse, por ejemplo, que si se supone simétrico el tiempo es de esperar que se conserve la energía. La simetría del tiempo significa que cualquier parte de él es igual que otra cualquiera; y que, por tanto, las leyes de la naturaleza manifiestan «invariancia en el tiempo» y son las mismas en cualquier momento.

En líneas generales, eso ha sido supuesto siempre por la humanidad, para sistemas cerrados. Si una cierta operación enciende un fuego, o funde mena de cobre, o hincha la masa del pan un cierto día, la misma operación hará igual al día o al año siguiente, en circunstancias análogas. Si no lo hace, sospecharíamos que el sistema ya no es cerrado; «puede haber influjos externos, obra de una bruja maligna o "espíritu"», dirían los místicos; o «de una humedad inesperada de la madera, de impurezas en el mineral, o frialdad del horno», dirían los racionalistas.

Si eludimos complicaciones estudiando las formas más sencillas de materia posibles (partículas subatómicas por acción de los varios campos que producen ellas mismas y las inmediatas), supondremos que obedecen a las mismas leyes en cualquier momento. Si un sistema de partículas subatómicas lo pudiésemos trasladar, con cierta «máquina del tiempo», a un instante de hace un siglo, o un millón de años, o a otro, futuro, de un millón de años, el cambio de época no podría notarse estudiando *sólo* el comportamiento de las partículas subatómicas.

Y si eso es cierto, también lo es la ley de conservación de la energía.

Claro que la invariancia del tiempo no es menos hipotética que la ley de conservación de la energía, y las hipótesis pueden no concordar con la observación. Así, algunos físicos teóricos han especulado sobre lentas disminuciones de intensidad de la interacción gravitatoria, con el tiempo. En ese caso se podría teóricamente notar un brusco cambio de época, notando la brusca variación del campo gravitatorio producido por las partículas de estudio. Ese decrecimiento de la intensidad gravitatoria aún no ha sido realmente comprobado; pero si existiese, la ley de conservación de la energía no sería verdadera del todo.

Descartando esa posibilidad, terminamos con dos suposiciones equivalentes:

la energía de un sistema cerrado se conserva, y las leyes de la naturaleza son invariantes en el tiempo.

O ambas son correctas, o las dos incorrectas; pero, a mi parecer, es la segunda la que nos ofrece mayor evidencia intuitiva. No nos preocuparía e] que, de vez en cuando, se crease o destruyese un poco de energía, pero nos sentiríamos en cierto modo muy incómodos en un Universo en el que las leyes de la naturaleza variasen de un día a otro.

Consideremos ahora la ley de conservación del «momento». El momento total (masa por velocidad) de un sistema cerrado no varía con las transformaciones del sistema. La conservación del momento es la que permite a los *diestros* en el billar actuar con precisión matemática. Hay otra ley independiente, la de conservación del «momento angular» en los giros alrededor de un punto o recta.

Ambas leyes de conservación, del momento y del momento angular, dependen del hecho de que las leyes de la naturaleza no varían con la posición en el espacio. En otros términos, si un grupo de partículas subatómicas se corren simultáneamente desde aquí a las cercanías de Marte, o a una galaxia remota, no podríamos advertirlo por la simple observación de las partículas subatómicas. (En realidad, la acción gravitatoria debida a las vecinas masas sería probablemente distinta, pero estamos estudiando la situación ideal de campos producidos sólo por las partículas, así que ignoramos las gravitaciones externas.)

Aquí también es más fácil admitir la necesidad de la invariancia en el espacio que la necesidad de la conservación del momento, o del momento angular.

La mayor parte de las restantes leyes de conservación implican también invariancias de algún tipo, pero no de algo que se pueda reducir a conceptos tan intuitivos como la simetría del espacio y del tiempo. La paridad es una excepción.

En 1927 el físico húngaro Eugenio P. Wigner demostró que la conservación de la paridad es equivalente a la simetría entre derecha e izquierda.

Eso significa que para que la paridad se conserve no ha de haber motivo para preferir la dirección derecha a la izquierda, o viceversa, al estudiar las leyes naturales.

Una bola de billar que alcance a otra a la derecha del centro y se desvíe hacia la derecha, se desviará exactamente lo mismo hacia la izquierda, si alcanza a la otra bola a la izquierda del centro.

Si una bola que sale rebotada hacia la derecha la miramos en un espejo paralelo a la trayectoria inicial, nos parecerá que se desvía hacia la izquierda. Si nos muestran diagramas del movimiento de la bola y de su imagen especular, examinando sólo esos diagramas no podríamos distinguir cuál era la bola real y cuál su imagen. Ambas obedecerán igual de bien las leyes de la naturaleza.

Una bola de billar, perfectamente esférica y sin marcas, posee simetría izquierda-derecha; es decir, su imagen será también esférica y sin marcas, y viendo sólo una fotografía de la bola y de su imagen no podríamos distinguirlas. Claro que si la bola llevase un dibujo asimétrico, como por ejemplo un 7, la distinguiríamos de su imagen, porque en ésta el 7 estaría «al revés».

La dificultad de distinguir el objeto de su imagen está disimulada por el hecho de que nosotros mismos somos asimétricos. No sólo tenemos ciertos órganos internos (hígado, estómago, bazo, páncreas) a uno u otro lado del plano central; también lo están ciertas partes visibles (la raya del pelo, por ejemplo, o ciertas señales de la piel).

Debido a ello nos es fácil distinguir si una imagen nuestra, o de una persona bien conocida, nos representa cómo somos o cómo se nos ve en un espejo, fijándonos, por ejemplo, en si la raya del pelo está «en su sitio».

Esto nos da la ilusión de que discriminar entre izquierda y derecha es cosa fácil, cuando en realidad no lo es. Supongamos que tuviésemos que describirle la derecha y la izquierda a un ser extraño, sin poder usar como referencia el cuerpo humano; por ejemplo, a un marciano, que no puede vernos. Podríamos hacerlo refiriéndonos a la tierra misma, si el marciano distinguiese su superficie, pues las configuraciones continentales son asimétricas. Pero ¿y si se tratase de alguien situado cerca de la Alpha Centauri?

Más clara es la situación si consideramos partículas subatómicas y las suponemos, ignorando nuestra información en contra, con simetría izquierda-derecha, como las bolas de billar; exactamente esféricas y sin marcas.

En ese caso, si nos dan sólo una fotografía de la partícula y de su imagen especular, no podremos distinguir una de otra.

Si la partícula está haciendo algo hacia nuestra izquierda, su imagen, especular hará lo mismo hacia nuestra derecha. Pero si la actuación hacia la izquierda y la actuación hacia la derecha fuesen igualmente posibles según las leyes de la naturaleza, seguiríamos sin poder distinguir la partícula de su imagen. Y ésa es precisamente la situación imperante, cuando se cumple la ley de conservación de la paridad.

Pero ¿y si dicha ley no se cumple en ciertas condiciones? Pues en esas condiciones la partícula es asimétrica, o está operando asimétricamente; es decir, haciendo «a izquierdas» algo que no puede hacerse «a derechas», o viceversa. En este caso podemos decir: ésta es la partícula y ésta es su imagen. Las distingo porque la imagen está «al revés»; es decir, haciendo algo imposible.

Eso equivale a reconocer que un retrato de un amigo nuestro es realmente su imagen especular, porque tiene la raya «al revés», o porque aparece escribiendo con soltura con la mano izquierda, cuando nosotros sabemos que en realidad no es zurdo.

Cuando Lee y Yang (véase capítulo 4) sugirieron que la ley de conservación de la paridad no regía en las interacciones nucleares débiles, eso significaba que no debía poderse distinguir un fenómeno nuclear débil de su imagen especular. Un fenómeno nuclear débil muy común es la emisión de un electrón por un núcleo atómico.

El núcleo atómico puede considerarse como un corpúsculo giratorio que tiene simetría Este-Oeste y también Norte-Sur, igual que la Tierra. Si tomamos la imagen especular de la partícula (la partícula imagen) parece que está girando «a la inversa»; pero ¿está usted seguro? Si la ponemos «cabeza abajo», la partícula imagen quedará girando en sentido directo y tendrá el mismo aspecto que la partícula. No podemos distinguir la partícula de su imagen por el sentido de giro, porque no sabemos si la partícula o su imagen están cabeza arriba o cabeza abajo. En cuanto al giro, una partícula imagen cabeza abajo tiene idéntico aspecto que una partícula cabeza arriba.

Claro que una partícula giratoria tiene dos polos, el Norte y el Sur, y según todas las trazas podemos distinguirlos. Marcando la partícula con un campo magnético fuerte, podemos comparar el sentido del eje de rotación suyo con el de la Tierra, e identificar el polo Norte y el polo Sur. De este modo podemos saber si la partícula está cabeza arriba o cabeza abajo.

Sí, pero estamos usando la Tierra como cuerpo de referencia, y la Tierra es asimétrica, por la posición y forma de los continentes. Si no nos refiriésemos a la Tierra (y no deberíamos, porque debiéramos ser capaces de reconstruir el comportamiento de las partículas subatómicas en las profundidades del espacio, lejos de la Tierra), no habría modo de distinguir el polo Norte del polo Sur. Ni fijándonos en giros ni en polos podríamos distinguir una partícula simétrica de su imagen especular.

Por otra parte, si los electrones tendiesen a brotar de un polo con más frecuencia que del otro, ya tendríamos marcado uno de ellos. Podríamos decir: «Mirando la partícula por el polo que da más electrones gira en sentido antihorario.» «Eso significa que esta otra partícula es, en realidad, una partícula imagen, porque, mirada así, lleva sentido horario.»

Eso es precisamente lo que sucedería si la ley de conservación de la paridad no rigiese en el caso de la emisión de electrones por los núcleos.

Pero ¿es eso cierto? Cuando los núcleos atómicos (trillones de ellos) están disparando electrones, los lanzan con uniformidad en todos los sentidos; pero ello es sólo porque los ejes nucleares están orientados en todas direcciones, por lo cual brotan electrones uniformemente en todos los sentidos, lo mismo si salen de un polo que si salen de los dos.

Para comprobar si los electrones brotan de los dos polos, o sólo de uno, los núcleos han de estar orientados de modo que todos los polos Norte apunten en el mismo sentido. Para conseguirlo hay que orientar los núcleos mediante un poderoso campo magnético, y enfriarlos hasta cerca del cero absoluto, de modo que no tengan energía de vibración que los «desoriente».

Luego que Lee y Yang formularon su idea, la señora Chien Shiung Wu, profesora ayudante de Física en la Universidad Columbia, realizó exactamente ese experimento. Los núcleos de cobalto 60, convenientemente orientados, lanzaban electrones por el polo Sur y no por el polo Norte.

De este modo quedó demostrado que la ley de conservación de la paridad no rige para las interacciones nucleares débiles. Lo cual significaba que, en esos casos, era posible distinguir entre derecha e izquierda; y el electrón, cuando le afectan las interacciones nucleares débiles, tiende a actuar «a izquierdas» y no «a derechas», así que puede decirse que «es zurdo».

El electrón, que lleva una unidad de carga negativa, tiene una «imagen» de otra clase. Hay una partícula, exactamente como el electrón, pero con una unidad de carga positiva. Es el «positrón».

En realidad, toda partícula cargada tiene una gemela, con opuesta carga: una antipartícula. Y hay una operación matemática que convierte la expresión que describe una partícula en otra que describe la antipartícula equivalente (o viceversa). Esa operación se llama «conjugación de carga».

Sucede que si una partícula es «zurda» su antipartícula no lo es, y viceversa.

Observemos, pues, que si un electrón está haciendo algo «a izquierdas» su imagen especular sería un electrón, haciéndolo «a derechas», lo cual es imposible; y esa imposibilidad serviría para distinguir la imagen de la partícula.

Por otra parte, aplicando la operación de la «conjugación de carga» un electrón se transformaría en un positrón «zurdo»; Este es también imposible, y tal imposibilidad serviría para distinguir entre imagen y partícula. Así, en las interacciones nucleares débiles, no sólo falla la ley de .conservación de la paridad, sino también la ley de conservación de la conjugación de carga [0].

Pero supongamos que no sólo se permuta en un electrón lo izquierdo por lo derecho, tomando su imagen especular, sino que al mismo tiempo se cambia su carga negativa en positiva. Hemos efectuado a la vez un cambio de paridad y un cambio de conjugación de carga. El resultado de este doble trueque sería convertir un «electrón zurdo» en un positrón «no zurdo». Como tanto el uno como el otro son posibles, por simple examen de un diagrama de cada uno no podríais averiguar cuál es la partícula objeto y cuál la imagen.

En otras palabras, aunque en las interacciones nucleares débiles no se conserva ni la paridad ni la conjugación de carga, sí se conserva la combinación de las dos.

Usando abreviaturas diremos que en las interacciones nucleares débiles no hay conservación P, ni conservación C; pero hay conservación CP.

Quizá no resulte claro cómo es posible que dos cosas no se conserven individualmente y sí en conjunto o, dicho de otro modo, cómo dos objetos, fáciles de distinguir cada uno de su imagen, no puedan distinguirse al tomarlos juntos. Pero veréis:

La letra *b,* reflejada en un espejo, da la *d.* La letra *d, r*eflejada en un espejo, da la *b.* Así, pues, tanto la *b* como la *d* se distinguen fácilmente de sus imágenes especulares. En cambio, si reflejamos en un espejo la combinación *bd,* la imagen es también *bd.* Se invierten la *h* y la *d,* y también el orden de sucesión. Esas tres inversiones se compensan y el resultado es que, aunque la *b y* la *d* se modifican por la reflexión, la combinación *bd* queda igual. (Ensayadlo en un espejo, con letras impresas minúsculas.)

Indiquemos otra cosa acerca de la reflexión derecha izquierda. Supongamos que se refleja en un espejo todo el sistema solar. Al observar la imagen veríamos todos los planetas girando «al revés» alrededor del Sol, y lo mismo la Luna alrededor de la Tierra; y que el Sol y todos los planetas girarían «al revés» sobre sus ejes.

Si ignorando la asimetría de la conformación superficial de los planetas mirásemos cada mundo del sistema solar sólo como una esfera sin detalles, no podríamos distinguir la imagen del sistema real sólo por sus movimientos. El estar girando todo «al revés» nada significa, pues si contemplamos la imagen, puestos «cabeza abajo», todo nos parecería girar «a derechas», y en el espacio exterior no hay modo de distinguir entre estar cabeza abajo y cabeza arriba.

---

[0] Ambas leyes rigen en las interacciones nucleares fuertes; en las cuales no sólo son igualmente naturales en toda ocasión el sentido izquierdo y el derecho, sino que cualquier cosa que pueda hacer una partícula podrá hacerla también la antipartícula con carga opuesta.

Y ciertamente la interacción gravitatoria, que es el factor predominante en el funcionamiento del sistema solar, no es afectada cuando se cambia lo derecho en izquierdo.

Si todos los giros del sistema solar se invirtiesen de súbito, las interacciones gravitatorias explicarían los movimientos invertidos, tan adecuada y correctamente como los directos.

Más reparad en lo siguiente:

Suponed que no usamos espejo alguno. En vez de ello imaginad que se invierte el sentido mismo del tiempo. El resultado sería como proyectar una película hacia atrás. Con el tiempo invertido, la Tierra parecería girar «hacia atrás» alrededor del Sol. Todos los planetas parecerían hacer otro tanto y la Luna giraría «hacia atrás» alrededor de la Tierra. Todos esos astros girarían «hacia atrás» sobre sus ejes.

Mas advertid que el «hacia atrás» que resulta de invertir el tiempo es exactamente el mismo «al revés» que se produce en la imagen especular. Invertir el curso del tiempo produce el mismo efecto que reflejar especularmente el espacio. Y por la sola observación de los movimientos del sistema solar no hay modo de saber si el tiempo transcurre hacia atrás o hacia adelante. Esta incapacidad de reconocer el sentido del transcurso del tiempo se da también en el caso de las reacciones subatómicas (conservación T) [0].

O consideremos lo siguiente:

Un electrón moviéndose en un campo magnético que apunta en determinado sentido se desviará hacia la derecha. El positrón, de carga opuesta, moviéndose en el mismo sentido, en el mismo campo, se desviará hacia la izquierda. Los dos movimientos son imagen especular el uno del otro; de modo que, en este caso, el paso de una carga a su opuesta produce el mismo efecto que la permutación entre izquierda y derecha.

O suponed que invertimos el curso del tiempo. Un electrón que se mueve en un campo podrá desviarse hacia la derecha de él, pero si se toma una película del movimiento y se proyecta «al revés», el electrón parecerá moverse hacia atrás, desviándose al mismo tiempo hacia la izquierda. De nuevo el curso del tiempo se relaciona con la simetría izquierda-derecha.

Parece, pues, que la conjugación de carga (C), la paridad (P) y la inversión del tiempo (T) están las tres íntimamente relacionadas, y las tres vinculadas, en cierto modo, a la simetría izquierda-derecha. Si esta simetría falla en la interacción nuclear débil respecto a una de ellas, la simetría puede ser restablecida con una de las otras dos, o con ambas.

Si una partícula está haciendo algo hacia la izquierda y su imagen hacia la derecha, lo cual es imposible (de suerte que la imagen puede reconocerse por fallo de la conservación de P), podemos invertir la carga en la partícula imagen, y convertir la acción en posible. Si la acción es imposible, aun con la carga invertida, de suerte que la imagen puede reconocerse por el fallo de la conservación CP, podemos invertir el curso del tiempo, y entonces resultará posible la acción. En otros términos, en la interacción nuclear débil hay «conservación CPT» [0].

Resulta, pues, que el Universo es simétrico, como lo ha sido y se le ha creído siempre, respecto a las interacciones nucleares fuertes, las electromagnéticas y las gravitatorias.

Sólo han estado en discusión las interacciones nucleares débiles, y en ellas el fallo de la ley de conservación de la paridad pareció introducir una asimetría básica en el Universo. La

---

[0] En las condiciones ordinarias podemos conocer bien fácilmente el sentido en que transcurre el tiempo por la variación de la entropía. Eso produce lo equivalente a una asimetría en el tiempo. Pero cuando la variación de la entropía es nula, como en los movimientos planetarios y en los procesos subatómicos, T se conserva.

[0] En realidad, en años recientes hubo ciertos indicios de que la CPT no se conserva infaliblemente en las interacciones nucleares débiles; y los físicos parecen haber estado examinando, con cierto aturdimiento, las posibles consecuencias. Pero en eso no parece haber aún nada definitivo; hemos de reservarnos y esperar.

ampliación del concepto de conservación a la CPT restableció la simetría, pero sólo teóricamente.

En la práctica, ¿nos proporciona en verdad un Universo simétrico la conservación CPT? En cuanto a P (paridad) hay en el Universo tanta derecha como izquierda.

En cuanto a T (inversión del tiempo) hay también igualdad entre pasado y futuro. Pero en cuanto a C (conjugación de carga) en la práctica falla la simetría.

Las partículas subatómicas más comúnmente afectadas por interacciones nucleares débiles son el electrón y el neutrino. Para que en la práctica existiese simetría tendría, pues, que haber igual proporción de positrones que de electrones, y la misma de antineutrinos que de neutrinos. Pero no es así.

En la tierra, y casi con seguridad en toda nuestra galaxia, y que nosotros sepamos en el Universo entero, hay ciertamente enorme número de electrones y neutrinos, pero apenas positrones y antineutrinos.

Así, pues, el Universo, por lo menos el neutro, o como mínimo nuestra sección de nuestro Universo, es electrónicamente «zurdo», lo cual puede tener un efecto interesante en el desarrollo de la vida.

Más para explicar eso hay que cambiar radicalmente de tema y de punto de partida. Lo haremos en el capítulo siguiente.

6. *Ver doble*

Yo suelo escribir en un departamento de dos habitaciones de un hotel, y hará un mes oí que alguien golpeaba con estrépito la pared del pasillo, por fuera. Naturalmente me puse furioso. ¿No se daba cuenta el aporreador, fuese quien fuese, de que en mis cuartos se estaba haciendo una delicadísima creación artística?

Salí al pasillo y vi allí, encaramado en una escalera junto a los ascensores, a un honrado trabajador, abriendo un agujero en la pared, con designios para mí enigmáticos.

«Oiga usted —le interpelé con ceñuda cortesía—.

¿Cuánto tiempo piensa usted estar atronando el mundo con sus horribles golpes?»

Y el sencillo hijo del trabajo, volviendo hacia mí su sudoroso rostro, me contestó severamente: «¿Cuánto tiempo le llevó a Miguel Ángel pintar el techo de la Capilla Sixtina?»

¿Qué iba yo a hacer? Solté una carcajada, me volví a mi celda y trabajé alegremente, al compás de los porrazos, que ya no me molestaban, puesto que los daba un artista tan consciente de su mérito.

En otras palabras, las obras duran lo que duran, y el mismo Miguel Ángel, con su espalda baldada de pintar aquellos frescos, palidece hasta la insignificancia frente a los intervalos de tiempo invertidos en construir algunos rincones del majestuoso edificio de la ciencia.

En el siglo XVII, por ejemplo, se suscitó una polémica sobre la luz, que siguió pendiente durante ciento cuarenta y ocho años, a pesar de que hasta que no fue zanjada no pudo tenerse en pie ninguna teoría sobre la naturaleza de la luz.

La historia empieza con Isaac Newton, que en 1666 lanzó un rayo de luz a través de un prisma y descubrió que se extendía en una cinta de arco iris, que él llamó «espectro».

Newton creyó que, puesto que la luz marcha en línea recta, tenía que consistir en una corriente de diminutos corpúsculos, moviéndose a enorme velocidad. Esos corpúsculos diferían de tal modo unos de otros, que producían las sensaciones de los distintos colores. En la luz solar estaban mezclados por igual y el efecto era que impresionaban nuestra vista como luz blanca.

Pero al penetrar en un cristal oblicuamente, los corpúsculos luminosos torcían bruscamente su camino; es decir, «se refractaban». Las partículas correspondientes a distinto color se refractaban en diferente medida, de modo que los colores de la luz blanca se separaban en el cristal. En una lámina corriente de vidrio de caras paralelas, el efecto se invertía, al salir la luz por la otra cara, de suerte que los colores se mezclaban de nuevo, dando luz blanca.

En un prisma era distinto. Los corpúsculos se desviaban bruscamente al entrar por una cara del vidrio, y después se desviaban de nuevo *en el mismo sentido,* al emerger por la otra cara, no paralela. Los colores, separados a la entrada del prisma, se separaban aún más a la salida.

Todo esto parecía bien lógico, y Newton lo abonaba con detallados razonamientos y experiencias. Y, sin embargo, Newton no sabía decir en qué consistía esa diferencia entre los corpúsculos que daba origen a los distintos colores.

En 1678, su contemporáneo el físico holandés Christian Huygens sugirió que la luz era un fenómeno ondulatorio. Eso permitía explicar fácilmente los distintos colores. Una onda de luz habría de tener una determinada longitud, y la *luz* de diferentes longitudes de onda bien podría impresionar al ojo como luz de colores diferentes, lo mismo que sonidos de longitudes de onda distintas impresionan el oído como de distintos tonos.

Sin embargo, las ondas ofrecían sus dificultades. Toda la experiencia humana relativa a ellas (las ondas del agua, por ejemplo, y las sonoras) probaba que las ondas contornean los obstáculos; mientras que la luz, por no penetrar detrás de ellos, produce sombras duras.

Huygens intentó explicar esto, demostrando matemáticamente que la incurvación alrededor de los obstáculos depende de la longitud de onda. Si ésta es *mucho menor* en la luz que en el sonido, la luz no se incurvará apreciablemente alrededor de los obstáculos comunes.

Newton reconocía la utilidad de la teoría ondulatoria, pero no podía admitir ondas tan diminutas como para dar sombras duras. Insistió en sus corpúsculos, y era tal su prestigio, que la generalidad de los científicos aceptaron la teoría corpuscular de la luz, para no ponerse en desacuerdo con él.

Mas en 1669, un médico danés, Erasmus Bartholino, hombre desconocido por completo, hizo una observación que le aseguró un puesto en la historia de la ciencia, por que suscitó una cuestión que los eminentes no pudieron resolver.

Había recibido un cristal transparente, obtenido en Islandia, y llamado por eso «espato de Islandia», siendo «espato» un nombre antiguo de los minerales no metálicos [0]. El cristal tenía forma de romboedro (una especie de cubo oblicuo) con seis caras, paralela cada una a su opuesta. Estaba Bartholino estudiando sus propiedades y supongo que lo apoyó sobre un papel escrito o impreso, y al levantarlo notó que la escritura se veía doble a través del cristal.

Y, en efecto, mirando a través del cristal veía uno siempre doble. Al parecer, cada rayo de luz que penetraba en el cristal era refractado, pero no todo él del mismo modo. Parte de la luz se desviaba un cierto ángulo y el resto un ángulo mayor; de manera que, aunque en el cristal entraba un solo rayo, emergían dos. El fenómeno se llamó «doble refracción».

Toda teoría sobre la luz debería explicar la doble refracción, y ni Huygens ni Newton podían hacerlo. Al parecer las ondas o los corpúsculos deben de ser de dos clases bien distintas, para que los de una clase se comporten de una manera y los otros de otra. Esa diferencia no puede tener relación con el color, puesto que todos los colores de la luz eran refractados doblemente, por igual, por el espato islándico.

En opinión de Huygens, las ondas luminosas eran «ondas longitudinales», es decir, análogas en estructura a las sonoras, aunque mucho más cortas. Representaban, pues, una serie de compresiones y enrarecimientos del éter que atraviesan. Huygens no veía cómo tales ondas longitudinales podían ser de dos especies, radicalmente distintas.

Tampoco veía Newton cómo los corpúsculos lumínicos podían pertenecer a dos distintas clases. Especulaba, con cierta vaguedad, que podrían diferir entre ellas de modo algo parecido a los polos opuestos de un imán; pero no intentó comprobarlo, porque no se le ocurrió modo de someterlo a la experiencia.

Los físicos se vieron precisados a enmudecer. La observación de Bartholino no se conformaba con ninguna de las dos teorías corrientes sobre la luz; luego había que prescindir de ella, en lo posible.

No fue aquello malicia por parte de los físicos, ni resultado de una obtusa «conspiración de silencio». Por el contrario, era razonable.

Supongamos que en un rompecabezas geométrico hay una pieza que «no encaja». Si dejamos las otras, y nos dedicamos a cavilar sobre ella, nada conseguiremos. Mas si la apartamos, y seguimos trabajando con las demás, como juzguemos conveniente, podrá llegar un momento en que, «gracias a ese otro trabajo», se nos revelan nuevas posibilidades; y de repente la pieza que tanta guerra nos dio encaja en su sitio, sin el menor esfuerzo.

Naturalmente la doble refracción no fue olvidada del todo. En 1808 aún seguía atascado el rompecabezas científico, y la Academia de París ofreció un premio al mejor trabajo matemático sobre el tema. Un ingeniero militar francés de veintitrés años, llamado Esteban

---

[0] Por si a alguien le interesa, precisaremos que el espato de Islandia es una variedad de carbonato cálcico.

Luis Malus, que aceptaba la teoría corpuscular de Newton, decidió intentar resolver el problema. Se proporcionó cristales birrefringentes y empezó a trabajar con ellos. No ganó ciertamente el premio, pero hizo una interesante observación y «acuñó» una palabra, que permanece en el vocabulario científico.

Desde su balcón se veía el Palacio de Luxemburgo, y en cierta ocasión una de las ventanas de ese palacio reflejó hacia su cuarto la luz del sol. Miró maquinalmente Malus en esa dirección, con un cristal birrefringente, esperando ver a través de él dos ventanas. ¡Pero no! Vio una sola.

Al parecer, lo que ocurría era que la ventana, al reflejar la luz del sol, reflejaba una sola de las dos clases de corpúsculos lumínicos.

Malus recordó lo que había dicho Newton: que las variedades de corpúsculos lumínicos podrían ser análogas a los dos polos de un imán. En esa línea de pensamiento, coligió que sólo se había reflejado «un polo» de luz, y que el rayo que iluminaba su cuarto sólo contenía corpúsculos de ese polo.

Malus habló, pues, del rayo que entraba en su habitación, como formado por «luz polarizada». Ese nombre se conserva hoy día, aunque está basado en una suposición falsa y a pesar de que la noción de «polos de luz» estaba siendo radicalmente desmentida ya antes de que Malus hiciese su observación.

Pues ya en 1801 un físico inglés, Thomas Young, emprendió una serie de experimentos que demostraron que un rayo de luz podía, en cierto modo, «apagar otro» con intermitencia, de suerte que ambos no se combinaban para dar un campo uniforme de luz, sino más bien una serie de franjas, alternativamente luminosas y oscuras.

Si la luz consistiese en corpúsculos, esa interferencia era sumamente difícil de explicar. ¿Cómo puede un corpúsculo anular a otro?

Más si la luz consiste en ondas, la explicación de la interferencia es de una facilidad infantil. Si, por ejemplo, la luz consistiese en enrarecimientos alternando con compresiones, entonces, cuando dos rayos de luz están acoplados de manera que el área de compresión de uno coincide con el de enrarecimiento del otro, y viceversa, las dos luces se compensarán, dando oscuridad.

Young consiguió explicar todas las características de sus modelos de interferencias por la ondulatoria de Huygens. Claro que muchos físicos, sobre todo los ingleses, intentaron objetar en nombre de Newton. Pero ni el nombre más glorioso basta para oponerse a observaciones que cualquiera puede repetir y a explicaciones que «explican» perfectamente. Así, pues, la teoría de las ondas prevaleció.

Sin embargo, Young no podía explicar la doble refracción mejor que Huygens.

En 1817, el físico francés Juan Fresnel sugirió que acaso las ondas de luz no fuesen longitudinales, al modo de las sonoras, y no representasen compresiones y enrarecimientos alternativos del éter. Quizá fuesen «ondas transversales», como las de la superficie del agua, en que ésta sube y baja, perpendicularmente a la línea de propagación.

Las ondas transversales explicaban la interferencia tan bien como las longitudinales. Si se funden dos rayos de luz, y uno está ondulando hacia arriba, cuando el otro hacia abajo, ambos se compensan y las dos luces dan oscuridad.

Las olas del agua, que sirven de modelo a las de luz, sólo pueden moverse de arriba abajo, perpendicularmente a la frontera bidimensional del líquido. Pero un rayo de luz tiene mayor libertad. Imaginémonos un rayo viniendo hacia nosotros; ondulará de arriba abajo, de izquierda a derecha y en todas las direcciones intermedias, perpendiculares a la dirección en que se propaga.

(Esto se ve más claramente atando a un poste el extremo de una cuerda y produciendo en ella ondas, de arriba abajo, de derecha a izquierda y oblicuas.)

Una vez propuestas las ondas transversales, fueron aceptadas con notable prontitud; pues mediante ellas pudo al fin explicarse el fenómeno de la doble refracción, ciento cuarenta y ocho años después de planteado el problema.

Para comprenderlo, consideremos que las ondas de luz de un rayo corriente vibran en todas las direcciones posibles, perpendiculares al camino de propagación (de arriba abajo, de derecha a izquierda y en todas las dirección intermedias). Eso representa la luz ordinaria o «no polarizada».

Pero supongamos que hubiera algún modo de dividir la luz en dos clases: una en que todas las ondas vibran de arriba abajo y otra en que vibran de derecha a izquierda.

Cada onda de luz no polarizada que vibra oblicuamente se dividirá en dos, de menos energía, de las clases permitidas. Si una cierta onda vibrase a 45° de la vertical se dividiría en una vertical y otra horizontal, cada una de ellas con la mitad de la energía. Y si la onda oblicua fuese más bien horizontal que vertical, de las dos componentes en que se divide, tendrá más energía la horizontal; y si fuese más bien vertical, sería la componente vertical la más fuerte.

Es fácil comprobar que, de hecho, un rayo de luz no polarizada puede dividirse en dos de igual energía, en uno de los cuales todas las ondas transversales vibran en una dirección, mientras que en el otro vibran en la dirección perpendicular a la anterior. Puesto que cada una de las ondas vibra en un solo plano, el rayo no polarizado puede considerarse dividido en dos rayos «plano polarizados», en sentidos perpendiculares entre sí.

Pero ¿qué es lo que hace que la luz se divida en rayos plano-polarizados? Pues ciertos cristales, que están constituidos por filas y columnas de átomos, alineados muy ordenadamente. Al atravesarlos, la luz se ve forzada a ondular sólo en ciertos planos.

Como tosca comparación, pondremos una cuerda, pasada entre dos palos de una cerca, y por el otro lado atada a una estaca. Si en la cuerda producimos ondas verticales, pasarán por el hueco entre los palos, de suerte que al otro lado de la cerca la cuerda vibra también. Si producimos ondas horizontales, las detienen los dos palos a uno y otro lado de la cuerda, y ésta no ondula al otro lado de la cerca. Si la hacemos vibrar en todos los sentidos, sólo atraviesan la cerca las ondas que se adaptan a la abertura entre ambos palos; así que, hagamos lo que hagamos, al otro lado de la cerca sólo habrá ondas verticales. El vallado polariza las ondas de la cuerda.

Los cristales como el espato de Islandia sólo permiten dos planos de vibración, perpendiculares entre sí. La luz no polarizada que penetra en ellos se divide allí dentro en dos rayos polarizados en planos perpendiculares entre sí. Esos rayos de luz polarizada, influidos de modo distinto por los átomos, avanzan a distintas velocidades, y el más lento se refracta bajo un ángulo mayor. Los rayos siguen dentro del cristal caminos separados y emergen por puntos distintos. Por eso es por lo que se ve doble, al mirar a través del espato de Islandia. Queda, pues, resuelto el problema de Bartholino.

La polarización plana puede producirse también por reflexión. Al incidir un rayo no polarizado en una superficie reflectante, bajo cierto ángulo, ocurre con frecuencia que las ondas que vibran en cierto plano son más intensamente reflejadas que las de otros planos. El rayo reflejado queda entonces fuertemente, y aun totalmente, polarizado: he aquí la solución del problema de Malus.

En 1828, un físico escocés, Guillermo Nicol, perfeccionó el cristal de espato islándico. Lo dividió por la mitad de cierta manera [0] y pegó las mitades con bálsamo del Canadá. Cuando la luz penetra en el cristal se divide en dos haces plano-polarizados, que marchan en direcciones ligeramente distintas, y alcanzan el bálsamo del Canadá bajo ángulos ligeramente

---

[0] Algunas veces siento tentaciones de usar diagramas y en varias ocasiones lo hago. Pero realmente yo soy hombre de palabras y procuro no apoyarme en muletas pictóricas. En este caso, los detalles del modo de dividir el cristal no afectan al razonamiento, y los suprimo.

distintos. El que incide más cerca de la perpendicular pasa a la otra mitad del cristal y sale al fin al aire libre. El que incide más oblicuo es reflejado y no penetra en la otra mitad del cristal.

En otros términos, por un lado incide en el cristal de Nicol un rayo de luz no polarizada, y por el otro emerge un solo rayo de luz plano-polarizada.

Imaginemos ahora dos prismas de Nicol, enfilados de tal modo que un rayo de luz que atraviese el primero entre en el segundo. Si ambos prismas están situados paralelamente, es decir, con las alineaciones atómicas idénticamente orientadas, el rayo de luz polarizada que atraviesa el primero emerge también, sin dificultad, del segundo.

(Es como una cuerda, pasada a través de dos cercas, ambas de barras verticales. Una ondulación de arriba abajo, que pase entre las barras de la primera cerca, pasará también entre las barras de la segunda.)

Pero, ¿y si los dos prismas de Nicol están orientados perpendicularmente el uno al otro? El rayo plano-polarizado emergente del primero se desvía un ángulo mayor en el segundo y se refleja en el bálsamo del Canadá que lo cementa. Del segundo prisma no emerge luz alguna.

Volviendo a la analogía de las cercas, si la segunda tiene horizontales las barras, se comprende que las ondulaciones verticales que cruzan la primera cerca serán detenidas por la segunda. A través de dos cercas, una de barras verticales y otra de barras horizontales, no puede pasar ninguna ondulación de la cuerda.

Supongamos ahora que disponemos el primer prisma de modo que quede fijo, pero que el segundo lo dejamos girar libremente. Instalemos también un ocular, para recibir la luz que atraviesa las dos.

Empecemos por ponerlos paralelos. Por el ocular veremos *luz* brillante. Giremos poco a poco el segundo prisma (el más próximo a nuestro ojo). Del segundo prisma emergerá cada vez menos luz procedente del primero, pues cada vez será más la reflejada en el bálsamo del segundo. Al girar éste, veremos, pues, luz cada vez más débil, hasta que, cuando ha girado 90°, ya no veremos luz alguna. Eso ocurre sea cualquiera el sentido en que giremos el prisma.

Dos prismas de Nicol permiten determinar el plano de vibración de un rayo de luz polarizada. Supongamos que ese rayo emerge del prisma fijo, pero no sabemos exactamente cómo está orientado dicho prisma; eso significa que ignoramos en qué plano vibra la luz emergente. Entonces bastará girar el prisma rotatorio, hasta que el rayo que vemos a su través presente su máximo brillo [0]. En ese momento el segundo prisma está paralelo al primero, y por la orientación común conoceremos el plano de vibración de la luz polarizada.

Por eso el prisma de Nicol fijo o primero se llama el «polarizador», y el segundo o giratorio, el «analizador».

Imaginémonos ahora un instrumento en el cual entre polarizador y analizador quede espacio para intercalar un tubo, conteniendo un líquido transparente. Para asegurar igualdad de condiciones se mantiene una temperatura fija, se usa luz de una sola longitud de onda, etc.

Si el tubo contiene agua destilada, no varía el plano de polarización de la luz que sale del polarizador. El aire, el vidrio, el agua, podrán absorber y absorben una insignificancia de luz; pero el analizador continúa señalando al mismo plano. Lo mismo ocurre si se pone una solución salina, en vez del agua destilada.

Pero si ponemos en el tubo una solución de azúcar, sucede algo nuevo. La luz que pasa por el analizador se debilita considerablemente, y no por la absorción; la solución de azúcar apenas absorbe más luz que el agua misma.

Además, si se gira el analizador la luz aumenta de nuevo. Podemos llegar a ponerla tan brillante como al principio, con sólo variar convenientemente la orientación del analizador.

[0] No es tan fácil saber cuándo es máximo el brillo; pero hay un artificio mediante el cual el círculo de luz que vemos aparece dividido en dos semicírculos. Giraremos el prisma hasta que ambas mitades brillen por igual, cosa fácilmente apreciable.

Eso significa que la solución de azúcar ha hecho girar el plano de polarización de la luz. Lo que produce ese efecto se dice que posee «actividad óptica». El instrumento usado para observar la actividad óptica se llama «polarímetro».

En 1840, el físico francés Juan Bautista Biot diseñó un útil polarímetro. Había sido de los primeros en estudiar la actividad óptica, mucho antes de inventar el polarímetro, para hacer más fácil y exacto su trabajo, y aun antes de que Nicol construyese su prisma.

En 1813, por ejemplo, Biot comunicó ciertas observaciones, que al fin se interpretaron conforme a la nueva teoría de las ondas transversales. Resultaba que un cristal de cuarzo, convenientemente cortado, desvía el plano de la luz polarizada que lo atraviesa. Además, cuanto más grueso era el cuarzo mayor era el ángulo girado por el plano; y, por último, algunas piezas de cuarzo desvían el plano en sentido horario, y otras en sentido antihorario.

El modo corriente de designar el giro horario era decir que el plano de polarización gira «hacia la derecha».

Realmente ése es un modo incorrecto y ambiguo de hablar. Si vemos de perfil un plano vertical, que gira en sentido horario, su parte superior gira, en efecto, hacia la derecha; pero la inferior gira hacia la izquierda, y viceversa, en el giro antihorario. Más cuando una denominación entra en la literatura, es difícil cambiarla, por oscura, inadecuada o francamente errónea que sea. (Recordad, por ejemplo, el mismo término «luz polarizada».)

Así que todo cuanto desvía en sentido horario el plano de polarización sigue llamándose dextrógiro, y levógiro cuanto lo desvía «hacia la izquierda».

Lo demostrado por Biot es que existen dos clases de cristales de cuarzo: dextrógiros y levógiros. En abreviatura hablaremos de «cuarzos *d» y* «cuarzos *l»*.

Sucede que los cristales de cuarzo son de forma un tanto complicada. En ciertas variedades de ellos —precisamente las que manifiestan actividad óptica— puede verse que hay unas pequeñas caras que existen a un lado del cristal pero no al otro, introduciendo una asimetría. Además, de esos cristales hay dos variedades: una en que la cara sin pareja está a un lado, y otra en que está en el opuesto.

Las dos variedades asimétricas de cristales de cuarzo son imagen especular una de otra. No hay modo, en nuestro espacio tridimensional, de girar una de ellas, dejándola igual a la otra, lo mismo que no se puede girar un zapato derecho, para que ajuste en un pie izquierdo.

Y una de las variedades es dextrógira y la otra levógira.

Era muy natural suponer que un cristal asimétrico desviaría el plano de polarización. La asimetría del cristal ha de ser tal que el rayo de luz, al atravesarlo, esté constantemente expuesto a una fuerza asimétrica, que por así decirlo tire más de él en un sentido que en otro. Así el plano se desvía, y sigue desviándose a velocidad constante, tanto más cuanto mayor espesor de cristal atraviesa. Es más, si un cristal desvía el plano en un sentido, es inevitable que, en igualdad de condiciones, el cristal imagen desvíe el plano en sentido opuesto.

Puede preverse también que cualquier sustancia capaz de cristalizar en una de dos formas especularmente simétricas será ópticamente activa. Y si las tomamos ambas en cristales de igual espesor y en condiciones exactamente idénticas (temperatura, longitud de onda, etc.), ambos cristales manifestarán justamente en la misma medida la actividad óptica: uno en sentido horario y otro en sentido antihorario.

En efecto, todos los experimentos realizados confirman esto plenamente.

Mas en esto vino Biot a echarlo todo a perder, descubriendo que ciertos líquidos, como la terpentina, y ciertas soluciones, de alcanfor en alcohol, o azúcar en agua, son también ópticamente activas.

Esto plantea un problema. En los cristales la actividad óptica está íntimamente vinculada a la asimetría; pero, ¿qué asimetría puede haber en el estado líquido? Ninguna que pudiese imaginar un químico en 1840.

Una vez más, la resolución de un problema científico sirvió para plantear otro, gracias al cielo; porque si no, ¿qué sería del interés de la ciencia? Habiéndose resuelto el problema de Bartholino y el de Malus, al establecerse el carácter transversal de las ondas luminosas, la ciencia se encontró con el problema de Biot: ¿cómo un líquido, exento al parecer de asimetría, puede producir un efecto, que lógicamente parecía producirlo sólo la asimetría?

Más esto nos llevará, en el capítulo siguiente, a la primera gran aventura de Luis Pasteur en la ciencia.

7. La molécula tridimensional

En la época en que yo me ocupaba, con plena dedicación, en dar clases en una facultad de medicina, luché siempre con la dificultad psicológica de enfrentarme a un auditorio malhumorado. Los alumnos se matriculaban para estudiar medicina. Querían batas blancas, estetoscopio, depresor de lengua y recetario. En vez de eso se encontraban con que en los dos primeros años (al menos mientras yo les di clase) tenían que entendérselas con «las ciencias básicas». Eso significaba que tenían que escuchar conferencias, muy por el estilo de las que habían soportado en el bachillerato.

Algunas de aquellas ciencias básicas tenían, al menos, clara relación con lo que ellos reconocían como asuntos médicos; sobre todo la anatomía, que les deparaba el placer de rajar cadáveres. Pero de todas las ciencias básicas, la que les parecía «de menos importancia inmediata», más ajena al trato entre enfermos y médicos, más abstracta, más académica y más plagada de despreciables Doctores en Filosofía como maestros, era la bioquímica; precisamente la que explicaba yo.

Varios medios ensayé para contrarrestar el natural menosprecio del estudiante de medicina hacia los bioquímicos. Lo que me daba mejor resultado, o al menos lo que me gustaba más, era entregarme a una exposición del «descubrimiento más importante de la historia de la medicina»; a saber, la teoría microbiana de las enfermedades. Yo sé ponerme muy patético, cuando me lo propongo, y les ponía en los cuernos de la luna el descubrimiento y sus consecuencias.

Y luego les decía: «Pero claro que, como ustedes todos darán por seguro, un simple médico no podía revolucionar tan profundamente la medicina. El descubridor fue Luis Pasteur, doctor en Filosofía y bioquímico.»

Sin embargo, el primer gran descubrimiento de Pasteur nada tuvo que ver con la medicina; fue neta cuestión de química. Se refirió al problema de las sustancias ópticamente activas, ya planteado en el capítulo anterior.

Para apreciar su labor, comencemos por el principio.

En el proceso de hacer vino por fermentación del mosto se produce una sustancia cenagosa, llamada *tártaro,* palabra de origen desconocido. De esa sustancia, el químico sueco Carlos Guillermo Sebéele aisló en 1769 un compuesto de propiedades ácidas, al que llamó, naturalmente, «ácido tartárico».

Eso en sí no tenía tan formidable importancia, pero luego Carlos Kestner, fabricante alemán de compuestos químicos, preparó en 1820 una sustancia, que creyó que debía ser ácido tartárico, pero que no lo parecía. Empezaba por ser notablemente menos soluble que el ácido tartárico. Buen número de químicos lo obtuvieron y lo estudiaron atentamente. Por último, el químico francés José Luis Gay-Lussac llamó a aquella sustancia ácido «racémico», del nombre latino del racimo de uvas.

Cuanto mejor se estudiaban el ácido racémico y el tartárico, más extrañas resultaban las diferencias entre sus propiedades. El análisis probaba que ambos tenían en su molécula idéntica proporción de exactamente los mismos elementos. En símbolos modernos, la fórmula de ambos era $C_4H_6O_6$.

A principios del siglo xix, cuando la teoría atómica llevaba sólo como un cuarto de siglo de existencia, los químicos habían resuelto que dos moléculas distintas tenían distinto contenido atómico, y que de hecho era la diferencia en el contenido atómico lo que daba lugar a la diferencia de propiedades. Aquí teníamos, sin embargo, dos sustancias bien distintas, con moléculas constituidas por los mismos elementos en iguales proporciones.

Resultaba aquello muy desconcertante, sobre todo porque no era la primera vez que se había advertido.

En 1830, el químico sueco J. Jacob Berzelius [0], conservador recalcitrante, que no creía en la posibilidad de moléculas de igual estructura y diferentes propiedades, estudió concienzudamente los dos ácidos, tartárico y racémico. Con honda contrariedad reconoció que aunque él no lo creyera era, no obstante, así. Se rindió a la evidencia, admitió el descubrimiento, y llamó a tales compuestos, de igual estructura y diferentes propiedades, «isómeros», de un vocablo griego que significa «iguales proporciones» (de los elementos, se entiende).

Pero, ¿cómo pueden los isómeros tener la misma composición atómica y ser, sin embargo, sustancias distintas?

Una posibilidad es que no sea precisamente el número de átomos lo distinto, sino su ordenamiento físico dentro de la molécula. Pero ese pensamiento era algo de lo cual huían los químicos. La creencia en los átomos era aún vacilante. Se les creía útiles para explicar las propiedades químicas, pero no había modo de verlos, ni de percibirlos; y podrían muy bien no ser más que cómodas ficciones. Ponerse a hablar de la ordenación efectiva de los átomos dentro de las moléculas era avanzar en el camino de admitir los átomos como entidades reales, más de lo que querían o se atrevían a hacer la mayoría de aquellos químicos.

El fenómeno del isomerismo quedó, por tanto, inexplicado, y siguió pendiente a la espera de que el progreso de la química proporcionase una explicación.

Especial interés presentaba una diferencia entre las propiedades de los ácidos tartárico y racémico. Una solución del ácido tartárico, o de sus sales (es decir, de compuestos en que el «hidrógeno ácido» era sustituido por un átomo de elementos como el sodio y el potasio), era ópticamente activa. Desviaba en sentido horario el plano de polarización de la luz, y era, por tanto, dextrógiro (véase el capítulo anterior), de modo que el compuesto bien se podía llamar ácido d-tartárico.

En cambio, una solución de ácido racémico era ópticamente inactiva. No desviaba el plano de polarización en ningún sentido. Esa diferencia de propiedades fue claramente demostrada por el químico francés Juan Bautista Biot, a quien citábamos en el anterior capítulo como un adelantado de la ciencia de la polarimetría.

Nadie sabía entonces por qué había de ser ópticamente activa una sustancia disuelta, pero lo que sí se sabía es que los cristales reconocidamente activos tenían estructura asimétrica. Así, pues, si procediésemos a preparar cristales de ácido tartárico y racémico, o de sus sales respectivas, seguramente resultaría que los del tartárico serían asimétricos, y los del racémico, simétricos.

En 1844, el químico alemán Eilhardt Mitscherlich emprendió esa investigación. Formó cristales de sal de sodio y de amonio de ambos ácidos y los estudió cuidadosamente; y anunció que ambas sustancias tenían sales absolutamente idénticas.

Los descubrimientos fundamentales de la floreciente ciencia de la polarimetría quedaron arruinados por esa noticia, y por el momento todo era confusión.

A esta sazón fue cuando entró en escena el joven químico francés Luis Pasteur. Tenía veintitantos años, y su hoja de estudios había sido mediocre; sin embargo, tuvo la temeridad de sospechar que era posible que Mitscherlich, químico de primera categoría, se hubiese equivocado. Al fin y al cabo los cristales que había estudiado eran pequeños, y acaso no había visto algunos pequeños detalles.

---

[0] Como habréis acaso advertido, tengo tendencia a mencionar a gran número de científicos, comentando siempre que puedo la labor de cada uno. No es por afición a las citas. Todo adelanto de la ciencia es debido al trabajo conjunto de numerosos colaboradores, a mí me gusta demostrarlo. Y me cuido de indicar las nacionalidades, porque también es importante reconocer el hecho de que la ciencia tiene carácter internacional.

Pasteur se dedicó al asunto y empezó a obtener cristales, y a estudiarlos penosamente con una lupa. Al fin decidió que había franca *asimetría* en los cristales sódicos y amónicos del ácido tartárico. ¡Buen principio! Eso se esperaba, al menos, ya que la sustancia era ópticamente activa.

Más ¿sería posible que las sales sódicas y amónicas del ácido racémico diesen cristales precisamente de la misma clase, como sostenía Mitscherlich?

En ese caso habría cristales asimétricos de una sustancia ópticamente inactiva, lo cual sería bien desconcertante.

Pasteur obtuvo y estudió los cristales de la sal del ácido racémico y los encontró ciertamente asimétricos también, pero no eran idénticos todos.

Algunos de ellos eran exactamente como los de la sal sódica y amónica del ácido tartárico; pero otros eran imagen especular de los primeros, asimétricos en el opuesto sentido.

¿Podría ser que el ácido racémico fuese la mitad ácido tartárico y la otra mitad una imagen especular del mismo, y que el carácter ópticamente inactivo de la mezcla fuese debido a que está constituida por dos partes que se compensan mutuamente?

Eso había que experimentarlo directamente. Por medio de su lupa y unas pinzas empezó Pasteur a operar sobre los diminutos cristales de la sal del ácido racémico. Echaba a un lado los derechos y al otro los izquierdos. Tardó mucho, pues no quería equivocarse, pero al fin lo consiguió.

Disolvió después en sendos tubos con agua los cristales de ambas clases, y encontró que las dos disoluciones eran ópticamente activas.

Una de ellas era dextrógira, exactamente igual que el ácido tartárico; como que era ácido tartárico en todos los sentidos.

La otra era levógira, y difería del ácido tartárico en que desviaba en sentido opuesto el plano de polarización. Era ácido d-tartárico. La conclusión de Pasteur, enunciada en 1848, cuando sólo tenía veintiséis años, fue que el ácido racémico era ópticamente inactivo, sólo por que constaba de cantidades iguales de ácido d-tartárico y ácido l-tartárico.

La noticia produjo sensación y Biot, el gran maestro de la polarimetría, que tenía entonces setenta y cuatro años, se negó cautamente a admitir el resultado de Pasteur, quien, en vista de ello, se propuso demostrárselo en persona.

Le dio Biot al joven una muestra de ácido racémico, después de comprobar personalmente que era ópticamente inactiva. Bajo la vigilante mirada del anciano Biot, receloso de «contrabando», Pasteur obtuvo la sal, la cristalizó, aisló los cristales y los clasificó trabajosamente, con sus pinzas y su lupa. Entonces intervino Biot: preparó personalmente las dos soluciones y las llevó al polarímetro.

Ya lo habrán adivinado ustedes. Encontró que ambas disoluciones eran ópticamente activas, en sentidos opuestos. Desde entonces, con entusiasmo genuinamente gálico, fue fanático partidario de Pasteur.

En realidad tuvo Pasteur muy buena suerte. Las sales sódica y amónica del ácido racémico no cristalizan necesariamente en cristales distintos, imagen unos de otros.

Pueden formarse también cristales mixtos, cada uno de ellos con el mismo número de moléculas del ácido tartárico-d *y* del l. Esos cristales mixtos son simétricos.

Si Pasteur los hubiese obtenido, también los habría encontrado diferentes de los de las sales del ácido tartárico, y habría desmentido a Mitscherlich; pero en cambio se habría perdido el descubrimiento, mucho más importante, del motivo de la inactividad óptica del ácido racémico; y no hubiese sido el primero en formar sustancias ópticamente activas a partir de otra ópticamente inactiva.

Ocurre que en disoluciones por encima de los 28° C sólo se forman cristales mixtos simétricos. Para obtener series separadas de cristales asimétricos hay que operar por bajo de los 28° C. Además los cristales formados suelen ser tan diminutos, que resultan demasiado pequeños para separarlos sólo con una lupa. Dio la casualidad de que Pasteur operó a temperaturas bajas y, en tales condiciones, obtuvo cristales de buen tamaño.

Podría descartarse a Pasteur, como hombre vulgar que se aprovechó de una oportunidad inesperadamente buena; pero, como solía decir yo en mi clase de bioquímica, después se las arregló para aprovechar «oportunidades» análogas cada cinco o seis años. Al cabo llega uno a convencerse de que el notable era Pasteur, y no las casualidades.

Como él mismo dijo una vez: «La casualidad favorece al entendimiento preparado.» A todos se nos brinda nuestra serie de oportunidades favorables, y el hombre insigne es el que sabe reconocerlas, cuando vienen, y aprovecharlas.

Pasteur siguió interesándose por el tema de los ácidos tartáricos. Halló que, calentando el d-tartárico en períodos prolongados y en determinadas condiciones, algunas de las moléculas pasan a la forma l, y se forma ácido racémico. Desde entonces se llama «racemización» el paso de la actividad óptica a la inactividad, por calentamiento, o por algún proceso químico que produzca la forma opuesta.

Pasteur encontró también una clase de ácido tartárico ópticamente inactivo, que de ningún modo podía desdoblarse en dos formas opuestas, y que poseía propiedades distintas a las del ácido racémico. Lo llamó *meso-tartárico* (de «intermedio», en griego); pues parecía intermedio entre las formas *d y l* del ácido.

Pero todos estos hechos no podían explicar la existencia de soluciones ópticamente activas. Admitido que algunos cristales son simétricos y otros asimétricos, de uno y otro sentido; pero en la disolución no hay cristales, hay sólo moléculas.

¿No podrán las moléculas mismas conservar la asimetría de los cristales? ¿No será la asimetría de los cristales simple reflejo de la de las moléculas que los componen? ¿No será la racemización consecuencia de la reordenación de los átomos en las moléculas, producida por el calor? De todo esto estaba seguro Pasteur, pero no veía modo de demostrarlo, ni de indicar cuál había de ser la reordenación.

Cierto que en 1860 el químico alemán Federico Augusto Kekule ideó un sistema que representaba las moléculas no sólo como conglomerados de tantos átomos de estos y los otros elementos, sino como asociaciones de átomos, unidos unos a otros en un orden determinado.

Entre los símbolos de los elementos se ponían guiones, para representar los vínculos o «enlaces» que los ligan; así que la molécula resultaba parecida a un meccano.

Sin embargo, los diagramas de Kekule se consideraban sumamente esquemáticos: una herramienta más, útil para los químicos que estudiaban las estructuras y reacciones orgánicas. Como sucedía con los átomos mismos, los químicos no estaban dispuestos a afirmar que los diagramas de Kekule representaban realmente la verdadera estructura de las moléculas.

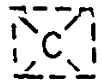
Dichos diagramas explicaban, sí, la existencia de muchos isómeros; pues mostraban grandes diferencias en la ordenación atómica, aunque fuese el mismo el número de átomos de cada elemento presentes en la molécula.

Pero en su forma primera, esos diagramas *no explicaban* los «isómeros ópticos», que diferían sólo en el sentido en que desviaban el plano de polarización.

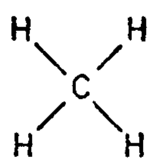
Llegamos ahora al químico holandés J. H. Van't Hoff, quien atacó el problema en 1874, cuando tenía sólo veintidós años. He aquí su probable línea de razonamiento.

Según el sistema de Kekule, un átomo de carbono se representa por la letra C, con cuatro rayitas alrededor.

Generalmente esas rayitas se ponen apuntando a los vértices de un cuadrado ideal, en la forma



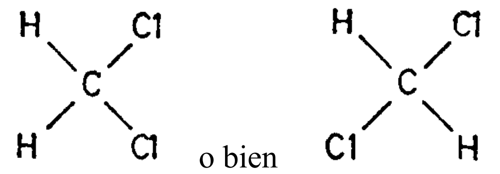
, de modo que el ángulo entre cada dos «enlaces» contiguos vale 90°. Un átomo de carbono se combina con cuatro de hidrógeno, para formar la sustancia llamada metano, que tendrá, pues, la estructura



¿Son idénticos los cuatro enlaces? Si cada uno fuese distinto del resto, ¿qué ocurriría si uno de los átomos de hidrógeno fuese sustituido por un átomo de cloro, para formar el cloro-metano? Pues que seguramente habría cuatro clorometanos distintos, según a cuál de los diferentes enlaces se hubiese ligado el átomo de cloro.,

Pero nada de eso. Hay un clorometano y basta. Esto indica que los cuatro enlaces del carbono son sin duda equivalentes, si los cuatro se unen a los vértices de un cuadrado, como parece natural. Un vértice del cuadrado no debe ser distinto de los demás.

Pero pensemos qué ocurrirá si sustituimos por átomos de cloro *dos* átomos de hidrógeno del metano, para formar bicloro-metano. Entonces, si los enlaces siguen apuntando a los vértices de un cuadrado, debe haber *dos* bicloro-metanos distintos, según que los dos átomos de cloro vayan a vértices adyacentes, o vértices opuestos del cuadrado; es decir:



Pero no los hay. Existe solamente un bicloro-metano, lo cual demuestra que es imposible que correspondan a la realidad los diagramas de Kekule (y claro que nadie aseguraba que correspondiesen).

Algo en lo que era casi seguro que no corresponderían a la realidad era que se trazaban, por sencillez, en dos dimensiones, y bastaba escoger una ordenación tridimensional (3-D) en la cual cada enlace quedase adyacente, por igual, a los otros tres. Sólo así sería de esperar un solo bicloro-metano.

La manera más sencilla de conseguir eso es apuntar los cuatro enlaces a los vértices de un tetraedro regular [0].

El átomo de carbono parece así apoyarse en tres enlaces, como en un trípode, mientras que el cuarto enlace apunta hacia arriba. Sea cualquiera el que apunta hacia arriba, los otros tres formarán siempre un trípode. El átomo de carbono puede, pues, tomar cuatro posiciones distintas, siempre con el mismo aspecto. Es más, cada enlace está a la misma distancia de los otros tres; el ángulo entre dos cualesquiera vale 109,5°.

Si usamos este «carbono tetraédrico», y con tal de que dos de los enlaces estén ligados a idénticos átomos, o grupos de átomos, no importa qué átomos —o grupos de átomos— estén ligados a los otros dos; en cada caso, todas las ordenaciones posibles son equivalentes y sólo se forma una molécula.

---

[0] El tetraedro regular es un cuerpo limitado por cuatro triángulos equiláteros. El mejor modo de entenderlo es ver un modelo tridimensional. A falta de él, a todos les es familiar la forma de una pirámide de Egipto (base cuadrada y cada pared subiendo hacia adentro, desde un lado de la base hasta el vértice de la cúspide). Pues figuraos que la base es triangular y tendréis el tetraedro.

Así, si ligamos a los cuatro enlaces de un átomo de carbono *a, a, a, a, o a, a, a, b,* o *a, a, b, b, o a, a, b, c,* no importará a qué enlace esté ligado cada átomo. Si se ligan de modo que formen dos ordenaciones, al parecer distintas, haciendo girar la primera de ellas de modo que apunte hacia arriba otro enlace, podemos dejarla idéntica a la segunda.

No ocurre así cuando tenemos cuatro átomos o grupos de átomos diferentes, ligados a los cuatro enlaces: *a, b, c, d.* En ese caso resulta que hay dos ordenaciones distintas, cada una imagen especular de la otra. Por mucho que las volvamos y giremos, nunca lograremos igualarlas.

Un átomo de carbono, ligado a cuatro átomos o grupos de átomos diferentes, es un «carbono asimétrico».

Resulta que las sustancias orgánicas químicamente activas tienen invariablemente moléculas asimétricas, en el sentido de Van't Hoff. Casi siempre existe al menos un carbono asimétrico. (A veces hay un átomo asimétrico que no es carbono, y otras veces es asimétrica la molécula en conjunto, aunque no lo sea ninguno de sus átomos de carbono.)

En el ácido tartárico existen dos átomos de carbono asimétricos. Cada uno puede adoptar una cierta configuración, o su imagen especular. Llamémoslas *p* y *q,* ya que la *q* es imagen de la *p.* Si los dos átomos de carbono son *pp,* tenemos el ácido d-tartárico, y si son *qq,* el l-tartárico.

Si las dos mitades de la molécula, con un carbono asimétrico cada una, no fuesen idénticas, tendríamos otras dos formas ópticamente activas: *pq* y *qp.* Pero en el caso del ácido tartárico, ambas mitades *son idénticas* en estructura, luego *pq* es idéntico a *qp;* en cada caso, la actividad óptica de una mitad compensa la de la otra. De ello resulta inactividad óptica y lo que tenemos es ácido meso-tartárico.

No es fácil ver todo esto sin cuidadosas fórmulas estructurales, con las cuales no quiero molestaros. Lo que es indispensable recordar es que desde 1874 hasta el presente día todas las cuestiones de actividad óptica, aun las más complejas, han sido satisfactoriamente explicadas, por la minuciosa consideración del átomo tetraédrico de carbono y de diagramas semejantes para otros átomos.

Aunque en el siglo transcurrido nuestro conocimiento de la estructura atómica se ha desarrollado enormemente, y se ha hecho incomparablemente más sutil, sigue siendo tan útil como siempre la imagen geométrica de Van't Hoff.

La comunicación de Van't Hoff sobre el átomo tetraédrico apareció en una revista holandesa, en septiembre de 1874. Dos meses después publicó una revista francesa una comunicación parecida. Era su autor el químico francés José Achule Le Bel, de veintisiete años. Los dos habían trabajado con independencia; de modo que, rindiéndoles parejos honores, suele hablarse de la teoría de Van't Hoff-Le Bel.

El átomo tetraédrico no obtuvo la inmediata aquiescencia de todos los químicos. Al cabo, aún no había pruebas directas de que los átomos existiesen de verdad (y durante la siguiente generación tampoco surgiría nada bastante directo y concluyente). Por eso, para algunos de los químicos más viejos y conservadores, esa nueva teoría, que le señalaba lugar fijo a cada enlace atómico, sonaba a mística.

En 1877, el químico alemán Kolbe, de cincuenta y cinco años, y en plena celebridad, publicó una dura crítica de Van't Hoff y sus ideas. Kolbe estaba muy en su derecho al criticarlas, pues se podía sostener que esas nuevas ideas desbordaban los fundamentos de la química de entonces.

Es, sin duda, esencial condición para el eficaz funcionamiento del método científico, que las ideas nuevas sean sometidas a severas críticas. Hay que impugnarlas leal; y deportivamente, con el puño y el martillo, porque una de las pruebas del valor de una nueva idea es su capacidad para sobrevivir a rudos ataques.

Pero Kolbe no fue ni deportivo ni leal. Calificó a Van't Hoff de químico prácticamente desconocido, que no entendía el asunto. Y más imperdonablemente, se rió de él porque trabajaba en la escuela veterinaria de Utrecht. Se las arregló para repetirlo tres veces en corto espacio, manifestando una deplorable pedantería profesional.

Sin embargo, para que nadie piense que «los consagrados» tienen poder para detener para siempre adelantos importantes, en provecho exclusivo de la pedantería y la rutina, declaremos que el átomo tetraédrico fue aceptado con razonable rapidez. Tan útil resultaba, que todas las acres diatribas de Kolbe no pudieron detenerlo, y la carrera de Van't Hoff prosiguió sin obstáculos.

Pronto llegó, en efecto, a ser uno de los primeros químicos teóricos del mundo; y al instituirse en 1901 los premios Nóbel, el primero que se concedió en química fue para él.

Hoy Kolbe, por lo que principalmente es conocido, no es por sus muy valiosas aportaciones a la química, sino por sus diatribas contra Van't Hoff, que se reeditan para divertir a los lectores [0].

Y una vez más, un nuevo adelanto planteó nuevos problemas. En cuanto quedó esclarecida la estructura del átomo de carbono y sus enlaces, y descritas detalladamente las moléculas en tres dimensiones (3-D), quedó de manifiesto una curiosa asimetría de la materia viviente, que será objeto del siguiente capítulo.

---

[0] Recientemente fui invitado a dar mi opinión sobre un libro de «ultra teoría», por alguien que decía necesitar conocerla, especialmente si era desfavorable, pues estaba haciendo una colección que «a posteriori» sería muy divertida de leer. El libro me pareció un disparate, pero recordando el infortunio de Kolbe, dudé, Mas al cabo decidí que no iba yo a escurrir el bulto por temor a la posteridad. Yo opinaba que las teorías eran carentes de valor y lo dije, pero lo dije con cortesía, cosa que nada cuesta.

8. *La asimetría de la vida*

Ayer mismo, estuve en Dayton, Ohio, en un coloquio telefónico de esos en los que se invita a los oyentes a hacer preguntas.

Una joven llamó y dijo: «Doctor Asimov, en opinión de usted ¿quién ha contribuido más a perfeccionar la moderna ficción científica?»

Tras brevísima vacilación respondí: «John W. Campbell[0], hijo.»

Y ella contestó: «¡Qué bien! Yo soy su hija Leslyn.»

Salí muy bien del paso, pero en mi interior me llevé, de momento, un susto. El motivo de mi segundo de vacilación al contestar fue que tuve que optar instantáneamente entre dos alternativas: responder honradamente que Campbell como lo hice, o echarlo a broma, como hago tan a menudo y decir "Yo". Con un auditorio visible, y contando con poder oír sus risas, yo habría optado indudablemente por la broma. Pero sin esperanza de reacciones tangibles, obré rectamente, a Dios gracias, y me evité un tremendo bochorno.

Pues bien, en la ciencia sucede a veces que una persona tiene que optar entre dos alternativas, y se enfrenta con la posibilidad de que su elección, sea cual sea, marque un sello indeleble. Si elige mal, el error puede resultar irremediable, y ser una fuente de interminables confusiones.

Así, Benjamín Franklin decidió una vez que había dos especies de fluido eléctrico, y que una de ellas era móvil y la otra estacionaria. Por eso ciertas sustancias, al frotarlas, adquirían un exceso (+) del fluido móvil, mientras otras perdían parte del móvil y quedaban con déficit (—). El déficit de uno reflejaba el exceso del otro fluido, del estacionario; así que podría decirse que las dos clases, + y —, mostrarían efectos eléctricos contrarios.

Y sí que los muestran. Una barra de ámbar y otra de vidrio manifiestan al frotarlas efectos eléctricos contrarios. (Se atraen entre sí, en vez de repelerse, como las igualmente cargadas: dos barras de vidrio, por ejemplo.)

La cuestión era: ¿cuál tenía exceso del fluido móvil y cuál déficit? ¿Cuál era (+) y cuál (—)?

No había absolutamente ningún modo de saberlo y Franklin se vio obligado a decidir. Resolvió que el ámbar tenía el exceso y le asignó el signo (+) y al vidrio le asignó el (—). Esto estableció la norma. Todas las demás cargas se refirieron a la opción de Franklin entre el ámbar y el vidrio, y hasta hoy se viene suponiendo en ingeniería eléctrica que la corriente fluye del polo positivo al negativo.

Por la norma de Franklin, se le señalan también signos a la carga de las dos partículas subatómicas de la materia corriente. Al electrón que tiende a moverse hacia el polo positivo se le da signo —, y el protón, que es atraído por el electrón, se considera +. Ellos representan, en cierto sentido, los dos fluidos eléctricos de Franklin; pero sucede que es el electrón el móvil y el protón el relativamente fijo; así que la corriente fluye, en realidad, del polo negativo al positivo.

Tenía Franklin un 50 por 100 de probabilidades de acertar, pero se equivocó. ¡Mala suerte! Por fortuna su errónea opción no tuvo efecto alguno en el desarrollo práctico de la electrotecnia, ni siguiera de la teoría. Pero siempre representa un defecto, irritante para los fanáticos de la perfección, como yo.

Pues en este capítulo mencionaremos de paso otra elección con 50 por 100 de probabilidades de acertar, y veremos cómo resultó.

---

[0] John Campbell, que murió e11 de julio de 1971, fue en opinión mía y de otros muchos la más eminente personalidad de todos los tiempos en el campo de la fábula científica. Mi deuda personal hacia él supera todos los cálculos: Ya lo he dicho en otro lugar pero quiero repetirlo aquí.

Volvamos al isomerismo óptico, objeto de los dos capítulos anteriores. Van't Hoff y Le Bel habían demostrado (véase el capítulo «La molécula tridimensional») que si los cuatro enlaces de un átomo de carbono se ligan a cuatro átomos —o grupos de átomos— distintos, ese carbono es «asimétrico». Los cuatro grupos ligados podrían estar en una de dos configuraciones posibles, esencialmente distintas, siendo la una imagen especular de la otra.

Como era de esperar, la naturaleza no tiene predilección, en ese respecto, entre izquierda y derecha. Dos compuestos, que estructuralmente difieren sólo en que uno es izquierdo y otro derecho, tienen idénticas propiedades químicas y físicas, y puestos en condiciones que no sean de suyo asimétricas, reaccionan siempre del mismo modo.

Podemos compararlos con las manos derecha e izquierda, o con los pies, narices o colmillos superiores.

En todos esos ejemplos, los dos órganos tienen idéntica forma y funciones. Cuanto uno puede hacer, puede hacerlo el otro, y generalmente lo hace de la misma manera. No serán acaso imágenes especulares perfectas; la mano derecha y la izquierda de un individuo, por ejemplo, no marcan las mismas huellas dactilares. Además, la mayoría de las personas usa una mano con más destreza que la otra; pero eso es porque el cerebro mismo no es perfectamente simétrico.

Los compuestos químicos, mucho menos complicados que la mano humana, muestran su simetría especular en mucho mayor grado de perfección que las manos. Lo que puede hacer una molécula «izquierda» puede hacerlo también su hermana «derecha», no menos bien.

Claro que una mezcla, a partes iguales, de gemelos derecho e izquierdo puede tener algunas propiedades distintas de las de cada uno de ellos por separado, como vimos en el capítulo anterior, en los ácidos racémico y tartárico; pero es otra cosa. Una mano derecha y una izquierda enlazadas se distinguen fácilmente de dos derechas o dos izquierdas puestas juntas, y, debido a la diferente disposición de los pulgares, funcionan evidentemente de distinto modo.

Para comprender la importancia de la simetría especular, supongamos que partimos de una molécula que no contiene ningún carbono asimétrico y la sometemos a una transformación química, que produzca uno. Si, por ejemplo, un carbono está enlazado con *a, b, c, c,* y cambiamos una de las c enlazadas en una *d,* de modo que el conjunto pase a *a, b, c, d,* el carbono simétrico se transforma en asimétrico.

La *d* puede sustituir a cualquiera de las dos c. Si sustituye a una resulta una molécula «izquierda» y si sustituye a la otra, resulta una «derecha». Las probabilidades están exactamente equilibradas; ningún resultado es preferido al otro. Por tanto, en toda reacción de esa clase, se producen números casi exactamente iguales de gemelos. Cualquier desviación de la igualdad exacta —y en un proceso casual son de esperar ciertas desviaciones— no será lo bastante grande para resultar apreciable.

Hagan lo que quieran los químicos —fuera de introducir una asimetría inicial— terminarán en una simetría.

A nivel molecular no hay modo de obligar a la naturaleza a optar por izquierda o por derecha.

Demos un rodeo por otro camino. Partamos de una mezcla de igual número de moléculas especulares derechas e izquierdas, y sometámosla a algún agente físico o químico, no asimétrico en sí, que modifique las moléculas. Las modificadas son tales que pueden separarse fácilmente de las primitivas. Si el agente, sea el que quiera, destruye la molécula izquierda algo más rápidamente que la derecha, o viceversa, lo que resta, al cabo de cierto tiempo, presentará exceso de una o de la otra. La mezcla terminará por ser asimétrica, o por lo menos ligeramente asimétrica. Pero eso tampoco ocurre nunca. No se puede producir asimetría molecular a partir de una situación inicial simétrica.

Hasta ahora he tenido cuidado de excluir los agentes asimétricos, pero imaginemos que nos decidimos a usar uno.

Supongamos una mezcla, a partes iguales, de dos gemelos simétricos especularmente, que llamaremos *b* y *d,* para usar letras especularmente simétricas. Supongamos que tenemos otro compuesto que *no contiene* carbonos asimétricos, de modo que sus moléculas son simétricas.

Llamémoslo o (letra simétrica). Si o se combina con *b* y con *d,* formando compuestos aditivos, resultarán *bo* y *od,* que siguen siendo especularmente simétricas, y no pueden separarse.

Mas ¿qué ocurre sí tenemos otro compuesto que contiene uno o más carbonos asimétricos, de modo que existe en forma derecha e izquierda, y tenemos sólo una variedad o la otra? Llamémosla *p.*

Formaremos otro compuesto aditivo, y llegaremos a *bp y -pd,* que no son especularmente simétricas (la imagen especular de *bp* es *qd* y no *pd).* Los compuestos aditivos, por no ser especularmente simétricos, tienen propiedades distintas y pueden separarse fácilmente. Después de separarlos, desdoblemos cada uno en *b* y *p o* en *p* y *d.* La *p* se elimina fácilmente y el químico se queda con *b* y *d,* en sendos tubos de ensayo. Tiene dos compuestos, cada uno de los cuales es asimétrico y ópticamente activo; eso se llama una «síntesis asimétrica».

Mas podríais preguntarme: ¿de dónde obtiene un químico el asimétrico *p?* Si sólo puede terminar en un compuesto asimétrico cuando empieza con un compuesto también asimétrico, ¿no habrá círculo vicioso? ¿De dónde procede el *primer* compuesto asimétrico?

Sucede que es fácil encontrar compuestos que de entrada son asimétricos, pero con una importante restricción: sólo pueden encontrarse en relación con la vida.

Efectivamente, en la naturaleza los compuestos asimétricos sólo existen en los tejidos vivos, o en materia que haya formado parte de un tejido vivo.

Aún podemos ir más lejos. Hay numerosas moléculas que tienen uno o más carbonos asimétricos y que se encuentran en tejidos vivos. En absolutamente todos los casos sólo se encuentra allí una de las partes ópticamente activas. Si en un tejido vivo existe un compuesto izquierdo, el derecho imagen suya no se encuentra jamás[0].

Y es más, la elección entre uno y otro gemelo no varía de unas especies a otras. Si es preferido el gemelo izquierdo en el tejido vivo de una especie cualquiera, lo será en *todos* los tejidos vivos de *todas* las especies. Toda la vida terrestre hace uso de una sola de cada dos moléculas gemelas posibles, y siempre *de la misma.*

(Eso explica de paso el hecho de que Pasteur pudiese separar mecánicamente las componentes gemelas del ácido racémico como narramos en el capítulo anterior. Como Pasteur estaba vivo, era él mismo asimétrico.)

¿Hay acaso alguna regularidad en el modo de encontrar en los tejidos los gemelos? A primera vista parece que no. Algunos compuestos del tejido viviente son dextrógiros y otros levógiros, y no parece advertirse regularidad. Consideremos, por ejemplo, dos azúcares muy comunes en el tejido vivo: la «glucosa» y la «fructosa».

Ambos están compuestos del mismo número de átomos, y son de propiedades muy parecidas; pero la glucosa es dextrógira y la fructosa levógira, así que tenemos d-glucosa y l-fructosa.

Me apresuro a advertir que no son entre sí especularmente simétricas. Cada una tiene su imagen especular, l-glucosa y d-fructosa, que no se dan en la materia viva.

---

[0] En realidad esas imágenes «no existentes» sí que se encuentran, en ocasiones y sitios especiales, en cantidades limitadísimas.

Su excepcionalísima existencia no hace más que confirmar la regla general.

En 1874, con la aparición de la teoría de Van't Of. - Le Bel, surgieron otras maneras, aparte de la rotación óptica, de caracterizar los gemelos especulares. ¿Por qué no determinar la situación efectiva de los diversos grupos alrededor del carbono asimétrico y ver si de ello se sigue alguna regularidad entre los compuestos hallados en los tejidos vivos?

Ese camino emprendió el químico alemán Emilio Fischer, quien hacia 1880 empezó a trabajar sobre moléculas de azúcar. Una molécula de glucosa tiene seis carbonos, de los cuales son asimétricos nada menos que cuatro. Cada uno de esos cuatro puede existir en dos formas gemelas, así que hay en total dieciséis formas de glucosa, dispuestas en ocho parejas de gemelos especulares.

Para simplificar, Fischer empezó con el compuesto azucarado más sencillo: el aldehído glicérico. Tiene tres carbonos, de los cuales sólo uno es asimétrico. Por tanto, sólo existe en dos formas gemelas: aldehído glicérico-d y aldehído glicérico-l.

Los cuatro diferentes grupos alrededor del único carbono asimétrico del aldehído glicérico podían estar dispuestos de dos modos diferentes. ¿Cuál de los dos correspondería al gemelo *d* y cuál al l*?* No tenía Fischer modo de averiguarlo, y lo supuso. Asignó a bulto un orden al aldehído d-glicérico y el otro al l-glicérico, estableciendo esa norma en un artículo publicado en 1891.

(Hasta 1951, sesenta años justos más tarde, no fue posible afinar lo bastante, en las investigaciones de las moléculas, para determinar la verdadera situación de los grupos. Eso lo consiguió un equipo de investigadores holandeses, dirigidos por J. M. Bijvoet. Descubrieron que, a diferencia de Franklin, Fischer *acertó,* al elegir con probabilidad del 50 por 100.)

Claro que Fischer no se detuvo aquí. Empezó a construir, muy minuciosamente, moléculas más complicadas de azúcar, indicando en cada una cuál debía ser el orden.

En todos los casos pudo demostrar concluyentemente que la ordenación estructural de un azúcar complicado, con más de un carbono asimétrico, estaba relacionada o con la pauta del aldehído d-glicérico o con la del l-glicérico.

Suponiendo que en los compuestos fundamentales fuese la supuesta por él, podía fijar la ordenación de todos los demás. (Si hubiese escogido mal, hubiese tenido que sustituir la ordenación en cada molécula de azúcar por su imagen especular; pero, según resultó al fin, había escogido bien.)

Halló que, aunque el aldehído d-glicérico era dextrógiro, algunos de los compuestos estructuralmente relacionados con él eran levógiros. No podía predecirse la estructura sólo por el sentido de la rotación óptica. Como las letras minúsculas indicaban ya el sentido de la rotación óptica, la «relación» se indicó mediante mayúsculas.

Cuando se usaba una mayúscula, el sentido de rotación se indicaba por (+) (dextrógiro) o (—) (levógiro).

Así, como la glucosa encontrada en los tejidos vivos está relacionada con el aldehído D-glicérico y es dextrógira, se llama D(+)-glucosa. La fructosa de los tejidos vivos está también relacionada con el aldehído D-glicérico y es levógira; es, pues, la *D(*—)-fructosa.

Una cosa interesante: todos los azúcares hallados en los tejidos vivos están relacionados con el aldehído D-glicérico, sea cualquiera el sentido en que desvíen el plano de polarización; son todos miembros de la serie D.

Dicho más aparatosamente, los azúcares de la vida son todos derechos [0].

Pero ¿por qué?

Si buscamos el motivo de irregularidades en la estructura de los compuestos del tejido vivo tenemos que fijarnos en las enzimas. Todos los compuestos sintetizados en tejidos vivos se sintetizan por mediación de moléculas de enzima, las cuales son todas asimétricas.

---

[0] Una nimia excepción: en la estreptomicina hay una sustancia relacionada con la L(—)-glucosa.

Debemos, pues, inquirir la naturaleza de la asimetría de las enzimas.

Todas ellas son proteínas. Las moléculas de proteína están formadas de cadenas de amino-ácidos, que se presentan en unas veinte variedades, todas ellas de muy semejante estructura. En cada una hay un carbono central que lleva ligados: 1.°, un átomo de hidrógeno; 2.°, un grupo amina; 3.°, un grupo carboxilo, y 4.°, cualquiera de los veinte distintos grupos que denominaremos conjuntamente «cadenas laterales».

En el aminoácido más sencillo, «la glicina», la cadena lateral es otro átomo de hidrógeno, así que el carbono central está ligado sólo a tres grupos diferentes. Por eso la glicina es simétrica y ópticamente inactiva.

En todos los demás aminoácidos, la cadena lateral representa un cuarto grupo ligado al carbono central, lo que significa que éste es asimétrico; y que cada aminoácido, fuera de la glicina, puede existir en dos formas especularmente simétricas. Pero en realidad cada aminoácido existe en los tejidos vivos en una sola de las dos; y en cada caso, se encuentra esa misma forma en todo tejido vivo de cualquier clase.

Pero ¿en cuál forma? Algunos aminoácidos son dextrógiros, en la forma natural existente, y otros levógiros; pero no hemos de guiarnos por eso. Hay que referir su naturaleza estructural al aldehído glicérico como pauta.

Al hacerlo resulta que, *sin excepción,* todos los aminoácidos existentes en materia viva de cualquier clase son de la serie L[0].

Podemos, pues, abstenernos en absoluto de preguntar por qué existe en los tejidos una forma de cierto azúcar —o de otro compuesto— y no su imagen especular, y concretarnos a los aminoácidos. De ellos se deriva todo, así que podemos preguntar: ¿por qué son todos los aminoácidos de la serie L?

No es difícil responder por qué todos los aminoácidos pertenecen a la misma serie. Cuando los aminoácidos se agrupan para formar una molécula de proteína, las cadenas laterales sobresalen por uno u otro lado, y algunas son muy abultadas. Las moléculas proteicas no tienen sitio sobrado para ellas.

Si la cadena de aminoácidos constase a la vez de ácidos L y ácidos *D,* ocurriría a menudo que un aminoácido L iría seguido inmediatamente de uno *D.* Entonces las cadenas laterales sobresaldrían por el mismo lado, y en muchos casos se estorbarían seriamente. Mas si, por el contrario, la cadena consta sólo de aminoácidos L, las cadenas laterales sobresaldrán alternativamente por uno y otro lado; quedará disponible más sitio, y podrá formarse más fácilmente una molécula proteica.

Pero... lo mismo ocurriría si la cadena constase sólo de aminoácidos *D.* En efecto, no hay razón para pensar que las proteínas compuestas sólo de aminoácidos D serían en nada diferentes en forma y función de las que ahora existen; que los organismos formados por esas proteínas *D* serían en nada inferiores a los existentes ahora; que una ecología entera, basada en organismos *D,* sería en ningún aspecto menos viable que el sistema que de hecho existe en el mundo.

Surge, pues, la cuestión: ¿por qué una y no la otra?

¿Por qué ha desarrollado la tierra una ecología L y no una D?

La explicación más sencilla posible y, por tanto, quizá la más probablemente verdadera, es que por efecto del puro azar.

En el océano primitivo, falto de vida, se estaban construyendo constantemente moléculas más complejas, a partir de las sencillas, gracias a fuentes de energía tales como la

---

[0] Bueno, casi casi. Hay algunos aminoácidos de la serie D que se encuentran muy estrechamente localizados, por ejemplo en las membranas celulares de ciertas bacterias.

radiación ultravioleta del sol. Entre esas moléculas en construcción había aminoácidos L y aminoácidos D[0].

Estos se asociaban en cadenas, que se desarrollarían con máxima facilidad, todas a partir de una de las formas, o de la otra; de modo que existirían a la vez cadenas *D* y cadenas L.

Al cabo, algunas cadenas se harían lo bastante complicadas para tener propiedades enzimáticas, y podrían quizá colaborar con ácidos nucleicos, que también estarían formándose. (Los ácidos nucleicos contienen cinco azúcares carbónicos en sus moléculas, que *siempre* son de la serie D.) Acaso por puro azar fuese una cadena de aminoácido L la primera que alcanzó la complejidad necesaria, y en combinación con el ácido nucleico empezó a multiplicarse. (Es característico de la vida el estar basada en moléculas capaces de formar réplicas de sí mismas.)

De ese modo, la molécula de proto-vida, sirviéndose a sí misma de modelo, pudo formar muchas más cadenas de aminoácido *L* de las que hubiese formado la simple casualidad. La ecología L había tomado la delantera y, por reproducirse a sí misma, nunca la perdería ya. La decisión entre L y D se habría, pues, consumado en el comienzo mismo de la historia de la vida.

Igual hubiese podido suceder lo contrario; de modo que si estudiásemos muchos planetas habitados, análogos a la Tierra, podríamos encontrar que como una mitad de ellos presentarían ecología D y la otra mitad ecología L.

Como los alimentos procedentes de organismos D no podrían digerirlos (o quizá sólo con dificultad) los organismos L como los nuestros, y como ello podría determinar manifestaciones de alergia, serias y aun fatales, la exploración de la galaxia por el hombre podría enfrentarse con un serio peligro. Un planeta podría ser un paraíso, y aun así resultar inadecuado para la colonización, si el análisis diese formas vitales *D*.

Pero, ¿tenemos que recurrir al puro azar? Hay fuentes de asimetría no vitales. La luz puede experimentar una polarización, llamada «polarización circular», que se manifiesta como giro, o hacia la derecha, o hacia la izquierda.

Una variedad especial de esa luz, siendo asimétrica, afectaría más a un compuesto que a su gemelo especular.

Un químico, partiendo de una mezcla de los dos gemelos a partes iguales, terminaría con exceso de uno de ellos, pasando de la simetría a la asimetría, sin intervención de la vida. Pero, en general, terminaría sólo con un 0,5 por 100, aproximadamente, de la asimetría que se obtiene con un solo gemelo.

Sin embargo, podemos imaginar, en el mundo primitivo, una fuente de luz circularmente polarizada; por ejemplo, la reflexión de la luz solar en la superficie del océano. Esa luz podría actuar con más intensidad sobre los aminoácidos D que sobre los L, y entonces los D se formarían con más dificultad, y se descompondrían más fácilmente una vez formados. Habría así una especie de preferencia intrínseca por la ecología L.

Lo malo es que no se ve razón para que la luz se polarice circularmente «a izquierdas», más que «a derechas». Si se polariza igual en los dos sentidos, como es de creer, no habrá preferencia.

Pero acaba de surgir algo nuevo: un botánico húngaro apellidado Garay (ignoro el nombre), comunicó en 1968 que una solución de aminoácidos, bombardeada con electrones energéticos del estroncio 90, no se descompone por igual. La forma D se descompone sensiblemente más de prisa que la L.

¿Por qué?

---

[0] Desde 1951 los químicos vienen intentando reproducir las condiciones primitivas; y de ese modo han obtenido aminoácidos, pero siempre de las formas D y L, en igual cantidad.

He aquí una posibilidad. Cuando las partículas beta se deceleran al atravesar la disolución emiten rayos gamma, polarizados circularmente. Si esos rayos se produjesen en igual cantidad en las formas izquierda y derecha, no importaría, pero ¿se producen así?

Como expliqué en el capítulo «El electrón es zurdo», la ley de paridad falla en las interacciones débiles, y ésas son las que afectan a los electrones. El fallo significa que el electrón no tiene simetría izquierda-derecha. Por decirlo así, «es zurdo». En consecuencia, los rayos que producen están polarizados circularmente «a izquierdas», y eso hace que los aminoácidos *D se* formen más difícilmente y, una vez formados, se descompongan con más facilidad.

Se deduce, pues, que la no conservación de la paridad lleva aparejada un sistema de preferencias en cuanto a los isómeros ópticos. En toda galaxia (o Universo) hecha de materia en la que predominen los electrones y protones debemos esperar, en los planetas con vida, un cierto predominio de la ecología L.

En cambio, en toda galaxia (o Universo) de antimateria, en la que predominen los positrones y antiprotones, hay que esperar predominio de la ecología D, en los planetas con vida.

Cierto que esta relación que postulamos entre la no conservación de la paridad y la asimetría de la vida es, por hoy, sumamente aventurada; pero yo me siento sentimentalmente inclinado a ella. Creo firmemente que la ciencia es única, y encuentro de una dramática justicia que un descubrimiento como el de la «no conservación de la paridad», que parece tan extra-humano y «de torre de marfil», sirva para explicar hechos tan fundamentales acerca de la vida y del hombre, de usted y de mí.

9. Los talasógenos[0]

En las «fiestas de cóctel» es donde más me tienta el orgullo de mí mismo, porque yo no bebo. Y conste que no es por virtud, es sencillamente que no me gusta el sabor de los licores y que, aun en cantidades pequeñas, me producen erupciones y respiración fatigosa. Así y todo, sin probar gota puedo estar tan ebrio de alegría como el que más del salón, y sin la resaca subsiguiente.

Lo malo es que nadie quiere creérmelo. Me rodean y acosan, preguntándome quince veces: «Pero ¿de verdad no quieres tomar nada?»

Es más, cuando me entra sed, tengo que acercarme a la barra, asegurarme de que nadie escucha y pedir al camarero, susurrando, un poco de agua.

Primero tengo que convencerle de que, de veras, quiero agua. Luego de que deseo un vaso grande, sin hielo.

Generalmente fracaso. Sin escuchar, coge un vaso de cóctel y me alarga «agua entre rocas»; lo que significa que dispongo de cinco centímetros cúbicos de líquido y que tengo que estar dándoles vueltas melancólicamente a los cubos de hielo, deseando que se derritan.

Nadie extrañará que me impaciente. La otra tarde en un cóctel uno de los asistentes estaba tronando contra la marihuana. «El noventa y tres por ciento de los que toman heroína —dijo— empezaron por la marihuana.»

Yo estaba realmente de su parte, pues soy enemigo de las drogas; pero miré el vaso de licor que tenía en la mano y dije: «¿Usted bebe sólo en reuniones?»

«Naturalmente», respondió.

«Pues bien —contesté—, todos los alcohólicos que existen empezaron bebiendo sólo en reuniones.»

Sea como quiera, nada malo hay en el agua. Es una bebida y además una sustancia muy singular.

Por ejemplo, los seis elementos más comunes del Universo en conjunto se supone que son: hidrógeno, helio, oxígeno, neón, nitrógeno y carbono, por este orden. De cada 10.000 átomos del Universo, unos 9.200 son hidrógeno; 790, helio; 5, oxígeno; 2, neón; 2, nitrógeno, y 1, carbono. Los demás componentes representan un residuo insignificante, y para muchos fines pueden ser sencillamente ignorados.

A base de esta información podemos preguntarnos cuál es, en el Universo, el «compuesto» más común (es decir, la sustancia con moléculas hechas de dos o más clases de átomos diferentes). Es de razón que el compuesto más común será alguno de moléculas pequeñas y muy estables, formadas por átomos de los dos elementos más comunes.

Como el helio no forma jamás parte de moléculas, quedan el hidrógeno y el oxígeno como los elementos más comunes que forman compuestos. Pueden combinarse un átomo de cada uno, formando hidroxilo (OH), que ha sido notado en los espacios interestelares de nuestra galaxia y, por lo menos, de otra. Sólo puede existir en medios tan enrarecidos como dichos espacios. Dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno forman el agua (H_20), y ésta puede existir a densidades planetarias y es, sin duda, el cuerpo compuesto más abundante en el Universo.

Naturalmente, el agua no puede abundar en todas partes. Claro que en una estrella normal no puede, en absoluto, existir; a las temperaturas estelares su molécula se disocia. En los cuerpos planetarios demasiado pequeños, la molécula de agua sería demasiado ligera y

---

[0] Es una palabra que acabo de inventar de vocablos griegos que quieren decir «productores de océanos». La defino como «sustancia capaz de formar un océano planetario».

movible para dejarse sujetar por la débil fuerza gravitatoria. Alguna quedaría ligada por fuerzas químicas a la corteza rocosa; pero eso representa un porcentaje muy pequeño del total. No es de extrañar, pues, que la Luna, Marte e, indudablemente, Mercurio estén relativamente secos.

En los planetas gigantes como Júpiter y Saturno, en los que el campo gravitatorio es intenso y la temperatura baja, la materia constituye una muestra mucho más representativa de la composición del Universo, y desde luego en esos mundos el agua es, con mucho, el compuesto más abundante.

La Tierra tiene una situación intermedia. Es lo bastante pequeña y caliente para haber perdido la mayor parte del agua que debió de poseer al principio. O bien, más probablemente, en el primer momento dejó escapar la mayor parte de la que había en la nube giratoria de polvo y gas de que se formó. Así y todo, el agua abunda extraordinariamente en la Tierra.

En dos aspectos es, sin duda, absolutamente única el agua de nuestro planeta. En primer lugar, el agua es, con mucho, el líquido más común de él. En realidad es el único líquido existente en cantidad en la Tierra. (¿Cuál será el segundo? Acaso el petróleo.)

En segundo lugar, el agua es la única sustancia existente en la Tierra en gran cantidad, en las tres fases, sólida, líquida y gaseosa. No sólo hay todo un océano de agua líquida, sino también casquetes polares de hielo, de millas de espesor, y vapor de agua, formando parte de la atmósfera, si bien en cantidades variables.

Ahora, queridos lectores, nos preguntamos: ¿podría ser el océano de otra sustancia distinta del agua? ¿Podría haber un planeta con un gran océano de otra materia? Para responder, repasemos los requisitos:

1º La materia del océano ha de ser un ingrediente abundantísimo de la mezcla universal. Cabe imaginar océanos de mercurio líquido, o cloro líquido, o cloroformo líquido; pero en la práctica no podemos concebir planeta alguno en que las especiales materias abunden lo suficiente para formar océanos.

2º La materia oceánica ha de tener una fase líquida preponderante. Los casquetes polares marcianos, por ejemplo, podrían bien ser anhídrido carbónicos helados; pero a la presión de la atmósfera marciana no hay anhídrido carbónico líquido. El anhídrido sólido se vaporiza directamente; así que no formaría un océano, aunque existiera en suficiente cantidad.

3º Igualmente necesitaríamos una sustancia, cuya fase líquida pudiera transformarse, con razonable facilidad, en la sólida o la gaseosa, haciendo posible las propiedades del océano terrestre, que producen casquetes polares, nubes, lluvia y nieve. Así, por ejemplo, un océano de galio líquido, a la temperatura de ebullición del agua, podría producir fácilmente casquetes de galio sólido; pero a esas temperaturas, la presión del vapor de galio sería tan baja que no habría en el aire vapor de galio digno de mención, ni nubes ni lluvia de galio. En cambio, si tuviésemos un océano de helio líquido a 2º absolutos –es decir, 2º K- habría en la atmósfera abundante vapor de helio (como que en realidad constituiría casi toda la atmósfera) y sería corriente la lluvia de helio; pero no sería probable que hubiese hielo ni nieve de helio, pues ni aún en el cero absoluto se forma el helio sólido, salvo a fuertes presiones; y nos resultaría difícil proyectar un planeta con presión suficientes a los2º K para realizar un océano.

Al reconsiderar los requisitos, empecemos por el primero: la existencia en cantidades oceánicas. Para ello lo mejor sería trabajar sólo con los seis elementos más abundantes: hidrógeno, helio, oxígeno, neón, nitrógeno y carbono. Cualquier compuesto de otros elementos podrá tener muchas ventajas, pero no existirá sencillamente en cantidad lo bastante abrumadora para formar un océano compuesto sólo, o casi sólo, de él [0].

---

[0] Hay una excepción concebible en un planeta como el nuestro. El sílice existe en cantidades oceánicas, pero es sólida y no se liquida más que al rojo blanco. Tachado el sílice.

De esos seis elementos hay dos, el helio y el neón, que no forman compuestos. Un tercero, el hidrógeno, sí los forma, pero existe en cantidades tan formidables que en cualquier planeta capaz de conservar más que residuos, es decir, en Júpiter, a diferencia de la Tierra, tiene que existir en forma predominantemente libre, por pura falta de suficientes cantidades de otros elementos para combinarse con él.

En cuanto al oxígeno, nitrógeno y carbono, éstos, en presencia de un exceso suficiente de hidrógeno, existirán sólo combinados con todo el hidrógeno posible. Existirá el oxígeno en el agua (H_2O), el nitrógeno en el amoniaco (H_3N) y el carbono en metano (H_4C).

Llegamos así a una lista de seis posibles tesalógenos: hidrógeno, helio, agua, neón, amoniaco y metano, en orden de abundancia.

Ahora tenemos que considerar cada uno en relación con su fase líquida. A las presiones ordinarias, tales como la producida por la atmósfera terrestre, cada uno tiene su temperatura fija de ebullición, por encima de la cual sólo existe como gas. Ese punto de ebullición puede subir, si la presión aumenta; pero ignorando estas variaciones, nos concretaremos al punto de ebullición, en grados absolutos, a la presión corriente.

Pues bien, los puntos de ebullición del helio, hidrógeno y neón son, respectivamente: 4,2; 20,3; y 27,3 grados K.

Pero no olvidemos que aun el remoto Plutón tiene una temperatura superficial de unos 60° K. Dudo, en verdad, de que ningún planeta grande, tal como los miem**bros** exteriores del sistema solar, pueda estar extremadamente frío. El calor interno desprendido por radiactividad ha de bastar para mantener la temperatura de la superficie al nivel plutoniano, como poco, aun en completa ausencia del Sol. Por ejemplo, Júpiter, según se ha visto en recientes estudios, irradia tres o cuatro veces más calor del que recibe del Sol.

En fin, que en cualquier planeta que podamos concebir razonablemente, la temperatura será demasiado alta para que existan helio, hidrógeno o neón en fase líquida y en grandes cantidades. Tachémoslos, pues, de la lista, y sólo nos quedan tres talasógenos: metano, amoniaco y agua.

¿Cuáles son sus puntos de ebullición? Pues 111,7°K, 239,8° K y 373,2° K, respectivamente.

Considerando estos tres, llegamos a las siguientes conclusiones:

1.ª El agua es el más abundante y, por consiguiente, el que con más probabilidad formará océanos.

2.ª Puesto que el metano está líquido en un margen de 23°, el amoniaco en uno de 44° y el agua en uno de 100°, de los tres es, con mucho, el agua el de más amplio margen de temperatura para la fase líquida, y el menos sensible a las variaciones térmicas, en sus cualidades «talasogénicas».

3.ª Más interesante aún: el agua forma un océano a temperaturas más altas que los otros dos. Podríamos esperar océanos de metano en un planeta como Neptuno; o de amoniaco en un planeta como Júpiter; pero sólo el agua, *ella únicamente,* podría formar océanos en planetas interiores como la Tierra.

Así, pues, para la existencia de nuestro océano y, por ende, de la vida, dependemos del hecho de que el agua tiene su intervalo líquido a temperaturas mucho más altas que cualquiera de los demás posibles talasógenos.

¿Será eso sólo, o tendrá además otras propiedades interesantes la molécula de agua? Veamos.

Cuando los átomos se combinan para formar moléculas, la asociación entre ellos se funda en una especie de «tira y afloja» entre los electrones más remotos de dichos átomos. Muchas veces un tipo de átomo es capaz de apoderarse de uno o dos electrones, por encima de los que posee de ordinario; a poca oportunidad que encuentre, capturará esos electrones.

Como el átomo en sí es eléctricamente neutro, porque las cargas positivas de su interior equilibran las negativas de fuera, y como cada electrón tiene una carga negativa, un átomo capaz de anexionarse uno o más electrones adicionales adquirirá, pues, carga total negativa. Los elementos constituidos por átomos tales se caracterizan como «electronegativos».

El más electronegativo de los elementos es, con mucho, el flúor. Le siguen, en este orden, el oxígeno, el nitrógeno, el cloro y el bromo. Esos son los únicos elementos fuertemente electronegativos.

En cambio otros átomos no tienen gran aptitud para captar electrones adicionales. Hasta encuentran difícil conservar los que poseen normalmente, y tienen suma tendencia a ceder uno o dos; a poca oportunidad que encuentren, lo harán. En cuanto pierden esos electrones, negativamente cargados, lo que queda del átomo tiene carga total positiva. Tales átomos son, pues, «electropositivos».

La mayor parte de los elementos tienden más bien a ser electropositivos. Los más electropositivos son los metales alcalinos, de los que el sodio y el potasio son los representantes más comunes. Otros ejemplos de elementos fuertemente electropositivos son el calcio, magnesio, aluminio y cinc.

Cuando un elemento electropositivo, como el sodio, encuentra otro electronegativo, como el cloro, el átomo de sodio cede libremente un electrón, que toma el de cloro, con la misma espontaneidad. Queda un átomo de sodio con carga positiva (un ion sodio), y uno de cloro con carga negativa (un ion cloro). La atracción entre ambos iones es el poderoso tirón de una fuerza electromagnética, que se llama la «electro-valencia». Cierto número de iones de cloro se agrupan alrededor de cada ion sodio. El resultado es una intrincada y muy regular ordenación de iones, estrechamente enlazados entre sí.

El modo más corriente de separar los iones es aplicar calor. Todos los iones, por muy fuertemente que los fije a un punto cualquier clase de atracción, están vibrando alrededor de él. Esa vibración depende de la temperatura. Cuanto más alta es ésta, más enérgica es la vibración.

Si la temperatura sube lo suficiente, la vibración se hará lo bastante violenta para separar los iones, por intensa que sea la atracción electromagnética entre ellos, y la sustancia se funde. (En la fase líquida, los iones ya no tienen lugar fijo y se deslizan libremente.)

Sin embargo, para vencer las fuertes atracciones entre los iones de sodio y los de cloro, la temperatura tiene que ser mucho más alta que las corrientes. El cloruro de sodio (sal común) tiene, pues, un punto de fusión relativamente alto: 1.074°K. (Para orientación, en un día primaveral agradable la temperatura es de 294° K = 21°C.)

Aún se precisan temperaturas más altas para separar del todo los iones, lanzándoles en parejas (un ion de sodio y otro de cloro) a la libertad casi total de la fase gaseosa.

Por eso, el punto de ebullición del cloruro de sodio es 1.686°K.

Lo mismo viene a suceder con todos los compuestos electrovalentes que se forman por intercambio de uno o varios electrones entre dos átomos. El óxido de molibdeno tiene su punto de fusión a 2.893° K, y el de ebullición a 5.070°K.

Mas ¿qué ocurre cuando un elemento electropositivo encuentra a otro? Los átomos de sodio, por ejemplo, pueden ligarse entre sí, haciendo que el electrón más lejano que posee cada uno (mantenido por una ligadura bien laxa) sea compartido por todos. Esa situación es más estable que la que resultaría si cada uno fuese responsable sólo de su electrón más lejano, como en el gas de sodio. Por eso, los átomos de sodio se adhieren entre sí y el sodio es sólido a la temperatura ordinaria. Claro que no se necesita mucho para separar los átomos, y el sodio funde a 370° K, temperatura poco inferior a la de ebullición del agua; pero no hierve, ni alcanza la total independencia atómica, hasta los 1.153°K. (Esos electrones más remotos pasan fácilmente de unos a otros átomos. Su existencia explica que el sodio y, en general, los metales, superen tanto a los no metales en la conducción de la electricidad y del calor.)

Los metales compuestos de átomos menos electropositivos se unen más fácilmente, y algunos terminan por formar asociaciones tan apretadas como las de cualquier compuesto electrovalente. El tungsteno tiene el punto de fusión a 3,640°K y el de ebullición a 6.150°K.

Mas aunque los átomos metálicos se adhieren bien entre sí, tienen todavía más tendencia a cederles electrones a los átomos electronegativos, especialmente al oxígeno, que es, con mucho, el más abundante de los elementos muy electronegativos. Por este motivo, en la corteza terrestre no queda virtualmente ningún metal puro [0].

Podemos, pues, decir que, en general, los metales y los compuestos electrovalentes se funden a temperatura tan alta que no hay ocasión para la fase líquida a las temperaturas planetarias posibles, ni aun a la de Mercurio. Los pocos relativamente fusibles, como el sodio y el tetracloruro de cinc, no existen en cantidad suficiente para formar océanos.

Busquemos, pues, por otra parte. ¿Qué pasa si se encuentran dos átomos electronegativos; por ejemplo, si un átomo de flúor se encuentra con otro? Cada uno de ellos puede con un electrón más, por encima de su asignación normal, pero ninguno de los dos está dispuesto a ceder un electrón suyo, para satisfacer al otro. Lo que sucede es que cada átomo permite al otro *compartir* uno de sus electrones. Es un pacto en que cada átomo cede y participa, y ambos quedan conformes.

Pero para que rija ese pacto, los dos átomos de flúor tienen que mantenerse muy próximos. Separarlos exige gran esfuerzo, porque significa romper el trato. Por eso, en condiciones ordinarias, el flúor puro existe en moléculas constituidas por parejas de átomos (F_2). La temperatura tiene que exceder bastante de 1.300° K para romper la molécula de flúor, lanzando cada átomo por su lado.

La atracción entre dos átomos con electrones compartidos se llama «enlace covalente».

Los átomos de flúor, una vez que han contraído su pacto bielectrónico, no tienen motivo para compartir electrones con otros átomos, ni mucho menos para cedérselos o recibirlos de ellos. El pacto bielectrónico satisface plenamente su apetencia de electrones. Por eso, cuando se encuentran dos moléculas de flúor, rebotan con poca tendencia a adherirse.

Si no tuviesen *ninguna* tendencia a ello, la molécula de flúor permanecería independiente de las cercanas, por mucho que descendiese la temperatura. Las moléculas se moverían cada vez más perezosamente y sus choques serían cada vez más flojos, pero nunca se pegarían.

Pero existen las llamadas «fuerzas de Van der Waals», del nombre del químico holandés que las estudió primero.

Sin entrar en detalles diremos sencillamente que entre los átomos y las moléculas existen fuerzas atractivas muy débiles, aunque entre ellos no haya cambio ni participación de electrones.

Gracias a las «fuerzas de Van der Waals» las moléculas de flúor son ligeramente pegajosas; y si la temperatura baja lo bastante, la energía que las mantiene en movimiento será insuficiente para hacerlas rebotar después del choque. El flúor pasará a líquido.

El punto de ebullición del flúor líquido es 85° K. Si la temperatura baja aún más, sus moléculas se sueldan firmemente, en filas ordenadas, y el flúor se solidifica. El punto de fusión del flúor sólido es 50° K.

Lo mismo sucede con los demás elementos electronegativos. El cloro, el oxígeno y el nitrógeno forman también «pactos entre dos átomos». Tenemos, pues, moléculas de esos

---

[0] La Tierra posee un núcleo metálico, porque tiene tanto hierro que no hay bastantes elementos electronegativos para entendérselas con todo él. El excedente metálico, más denso que los compuestos electrovalentes que contienen oxígeno, se depositó en el centro de la Tierra en los tiernos días juveniles de nuestro planeta.

cuerpos, constituidas cada una por dos átomos (Cl_2, O_2, N_2). Hasta los átomos de hidrógeno, que no son especialmente electronegativos, forman moléculas por pares (H_2).

En todos éstos, los puntos de fusión y ebullición son bajos; su valor depende de las fuerzas de Van der Waals.

El hidrógeno, de átomos pequeñísimos, tiene su margen líquido a temperaturas considerablemente más bajas que el flúor. El hidrógeno líquido hierve a 21°K y se congela a 14° K.

Hay unos cuantos átomos que parecen satisfechos con los electrones que poseen. Tienen poca tendencia a ceder ninguno, y aún menos a aceptar electrones adicionales ajenos. Por tanto, no tienden a formar compuestos.

Son los llamados «gases nobles».

Hay seis en total. De ellos, los tres de átomos mayores pueden formar compuestos, no muy estables, con los elementos más electronegativos, tales como el flúor y el oxígeno. Los tres de átomos menores, argón, neón y helio, por orden de tamaños, no los forman ni con ésos, en las condiciones experimentadas hasta ahora. Permanecen en triste soledad, como átomos sueltos.

Sin embargo, ellos también experimentan la mutua atracción de las fuerzas de Van der Waals, y suficientemente enfriados, se licuan. Cuanto menor es el átomo, más flojas las fuerzas y más enfriamiento se precisa para la licuefacción.

El helio, el de átomos menores de los gases nobles, experimenta atracciones tan flojas que es la sustancia más difícil de liquidar de cuantas se conocen. Su punto de ebullición es formidablemente bajo: 4,2° K. El helio sólido no existe en absoluto, ni aun a 0° K (cero absoluto), salvo a considerables presiones.

Pero hasta ahora estas sustancias gaseosas consideradas, que son covalentes y tienen sus márgenes líquidos en lo más bajo de la escala térmica, eran todas elementos que, o bien existen en átomos aislados, como en el caso del helio, o en moléculas diatómicas, como en el caso del hidrógeno.

¿Será posible que moléculas de dos diferentes átomos sean de naturaleza covalente y tengan bajas temperaturas de fusión y ebullición? Sí que lo es.

Consideremos el carbono, que no es ni muy electropositivo ni muy electronegativo. Tiene tendencia a concertar pactos bielectrónicos con cada uno de otros cuatro átomos. Puede concertarlos con otros cuatro átomos de carbono, cada uno de los cuales con otros tres, y ésos con otros tres cada uno, y así indefinidamente. Al final, incontables trillones de átomos de carbono pueden estar sólidamente trabados entre sí, por fuertes enlaces covalentes. La consecuencia es que el carbono tiene más alto punto de fusión que cualquiera otra sustancia conocida: unos 4.000° K.

Pero el átomo de carbono puede también formar pacto bielectrónico con cuatro diferentes átomos de hidrógeno.

Estos sólo pueden formar un pacto bielectrónico cada uno; así que la molécula resultante consta de un átomo de carbono, rodeado de cuatro hidrógenos (H_4C), y ése es el metano.

Las moléculas de metano se atraen poco entre sí, salvo unas débiles fuerzas de Van der Waals. El punto de ebullición del metano líquido es 112°K y el de fusión 89° K.

Análogamente, un átomo de carbono puede formar molécula con uno de oxígeno, dando monóxido de carbono (CO), cuyos puntos de ebullición y de fusión son, respectivamente, 83° K y 67° K.

Llegamos así a una conclusión general. A diferencia de los metales y compuestos electrovalentes, los compuestos covalentes tienen puntos de fusión y de ebullición bajos, y sólo ellos pueden concebirse como talasógenos a temperaturas planetarias plausibles.

Esto nos da una primera explicación de por qué el agua es un talasógeno; es un compuesto covalente por esencia. Bien, eso es cierto, sin duda. Pero muchos compuestos covalentes están líquidos a temperaturas demasiado bajas, si acaso, para las condiciones planetarias y, desde luego, para las especiales terrestres. ¿Por qué está, pues, «tan caliente» el agua líquida?

Una posibilidad consiste en el hecho de que, en general, cuanto mayor es el átomo o molécula covalente, más intensas son las fuerzas de Van der Waals y más alto el punto de ebullición. Consideremos la siguiente tabla, en la cual el tamaño de la molécula viene medido por su peso molecular (o sea, en el helio y neón por el peso atómico).

Sustancia	Peso molecular (o atómico)	Punto de Ebullición (°K)
Hidrógeno (H_2)	17	2
Helio (He)	4	4
Neón (Ne)	27	20
Nitrógeno (N_2)	77	28
Monóxido de carbono (CO) ...	83	28
Oxígeno (0_2)	90	32
Flúor (F)	85	38
Óxido de flúor (OF_2)	138	54
Fluoruro de nitrógeno (NF_3)	153	71
Cloro (Cl_2)	239	71
Pentano (C_5H_{12})	309	72
Eptóxido de cloro (Cl_2O_7) ...	355	183

La correspondencia no es perfecta, pues el helio, con peso atómico mayor que el molecular del hidrógeno, tiene, no obstante, un punto de ebullición más bajo. Sin embargo, la tabla parece demostrar que, a grandes rasgos, existe relación entre el peso molecular y el punto de ebullición, en el caso de los compuestos covalentes.

Podríamos, por tanto, concluir que el agua, cuyo punto de ebullición es 373°K, debe tener un peso molecular mayor, o al menos no mucho menor, que el eptóxído de cloro. Su peso molecular debía valer unos 180, como mínimo.

Pero nada de eso. El peso molecular del agua es 18, justamente la décima parte del que «debería ser».

Es evidente que algo «va terriblemente mal» o, mejor dicho, «bien»; porque sea cual sea la causa de esa anomalía, a ella debemos nuestro vivificante océano. En el capítulo siguiente estudiaremos cuál sea ese «mal» o ese «bien».

10.El agua caliente

Una de las peripecias profesionales de cuantos divulgamos la visión científica del Universo es el choque con lectores que prefieren determinada visión religiosa a la científica. Les ofende que reduzcamos a consecuencias ciegas de alguna ley física o química las manifestaciones admirables de la providencia divina, y muy a menudo reaccionan, acusando de ateísmo al autor.

Ayer mismo recibí una carta de una señora, que empezaba llamándome, muy cumplida, «muy señor mío»; y luego continuaba, con menos ceremonia: «Según la Biblia, y en términos textuales de ella, es usted un necio.»

Eso me enfadó, naturalmente, pues aunque en ocasiones soy tan necio como cualquiera, me disgusta que me lo digan. Además la acusación iba más allá de la simple necedad. Era obvio que la señora se refería a un bien conocido texto bíblico.

Entre las ciento cincuenta poesías del libro de los Salmos hay dos, la 14 y la 53, que son virtualmente iguales, y cuyo primer verso empieza: *El necio ha dicho en su corazón: no hay Dios.*

¿Qué podía yo hacer? Resolví que una cita bíblica merece otra, como respuesta, y le mandé a la buena señora la siguiente breve sentencia: *... quienquiera que llame «loco» a su hermano se expone al fuego eterno* (Mat. 5:22)[0].

Pero ¡ay! Habiendo «despachado» a un rival tengo ahora que exponerme a ofender a otros, de esos a quienes Robert Burns llamaría «los demasiado buenos». Por que verán ustedes: el agua tiene propiedades maravillosas, que parecen predestinadas precisamente para la vida.

¡Sería tan piadoso considerarlas como obra de un benéfico e ingenioso Hacedor, que crea el mundo para bien de los indignos hombres; y es tan prosaico atribuírselas a las indiferentes propiedades del átomo!

Yo, sin embargo, para ser fiel a la visión científica del Universo, tengo que hacer lo segundo, indicándoles a los piadosos que pueden muy bien suponer que esas propiedades indiferentes han sido creadas por Dios.

En el anterior capítulo indiqué que el agua es el único talasógeno posible, en un planeta a la temperatura terrestre; el único compuesto que puede existir en forma líquida, en cantidad suficiente para formar un océano.

Para estar líquida a las relativamente bajas temperaturas de la tierra, una sustancia tenía que constar, como explicábamos, de moléculas covalentes; es decir, moléculas en las cuales hay parejas de átomos vecinos que comparten electrones en buena vecindad, en vez de realizar intercambios totales de uno o más electrones, entre un átomo y otro.

En general, cuanto mayor sea el peso molecular de un compuesto covalente, más alto estará el margen térmico de su fase líquida. Desde ese punto de vista, sería de esperar que una sustancia, que está líquida a las temperaturas del agua, tuviese un peso molecular de unos 180. Pero el peso molecular del agua es 18, la décima parte justa de lo que debía ser. Es sorprendente lo caliente que está el agua líquida con relación a su peso molecular, ¡Bien merece llamarse «agua caliente»!

Pero ¿por qué será así? ¿Será una simplificación excesiva el relacionar las temperaturas de la fase líquida *sólo* con el peso molecular?

Al final del capítulo anterior hicimos una lista de pesos moleculares y puntos de ebullición, sin intento de discriminaciones, método probablemente desacertado, porque asocia

---

[0] Del Sermón de la Montana, por si no lo conocéis.

sustancias compuestas de elementos distintos, que difieren ampliamente entre sí en propiedades químicas y físicas. Los elementos forman familias de miembros bastante parecidos. Acaso convendrá limitarse a los miembros de una familia, y ver qué regularidades presentan.

Comparemos, por ejemplo, pesos atómicos y puntos de ebullición de los seis miembros de la familia de los gases nobles:

TABLA 1

Elemento	Peso atómico	Punto de ebullición (°K)[0]
Helio (He) ..	4,0	4,2
Neón (Ne) ...	20,2	27,2
Argón (Ar) .	39,9	87,4
Criptón (Kr)	83,8	120,2
Xenón (Xe)	131,3	166,0
Radón (Rn) .	222,0	211,3

Observamos una elevación continua del punto de ebullición con el peso atómico, como podría esperarse, tomando el asunto con toda sencillez. Después de todo, al hacerse más pesados los átomos, se necesita más energía en forma de calor para arrancar unos átomos de otros y lanzarlos separados a la forma de vapor.

¿Y si pasamos a los cuatro elementos de otra familia, los halógenos, tan bien definida como la de los gases nobles? (Véase Tabla 2.)

TABLA 2

Elemento	Peso atómico	Punto de ebullición (°K)
Flúor (F) ..	19,0	85,0
Cloro (Cl) ..	35,5	238,5
Bromo (Br)	79,9	331,9
Yodo (I) ...	126,9	457,5

También aquí el punto de ebullición se eleva continuamente con el peso atómico. Hay un quinto halógeno, el último de la familia, que se llama astatio. Es un elemento radioactivo que, aun en su forma más estable (de peso atómico 210) tiene una vida media de sólo 8,3 horas.

Todavía no se le ha obtenido en cantidad suficiente para determinar bien el punto de ebullición; pero yo apostaría, a ciegas, cualquier cantidad razonable, a que anda por las inmediaciones de los 570° K.

Mientras que en cada familia de elementos la variación es continua, veamos lo que ocurre al pasar de una a otra. Comparemos las Tablas 1 y 2. El neón y el flúor no se

[0] °K representa la escala absoluta de temperatura (grados Kelvin), con el cero a -273,16 °C (cero absoluto).

diferencian mucho en peso atómico, pero el punto de ebullición del flúor es triple más alto que el del neón.

Eso prosigue en toda la serie: cada halógeno viene a tener su punto de ebullición tres veces más alto que el gas noble de peso atómico parecido.

¿Será que, además del peso atómico, hay otros factores que influyen? Claro que los hay. Los átomos de los gases nobles son químicamente inertes y no se combinan entre sí; permanecen como átomos sueltos. En cambio los átomos de los halógenos, por sus ordenaciones electrónicas características, distintas a las de los gases nobles, se combinan en parejas. El flúor no consta de átomos separados, como el neón, sino de moléculas, compuesta cada una por dos átomos, y su peso molecular es 38,0. Para estimar la energía necesaria para lanzar a la fase gaseosa las partículas constitutivas del flúor líquido debe contar el peso de la molécula y no el del átomo. El peso molecular del flúor es casi doble del peso atómico del argón y, en efecto, el punto de ebullición del flúor es parecido al del argón.

Si nos detuviésemos aquí tendríamos establecida una relación, a grandes rasgos, entre el tamaño de la partícula (átomo o molécula y el punto de ebullición. Pero en la ciencia no está bien detenerse en cuanto se encuentra la respuesta deseada. Hay que ser lo bastante deportivo para mirar adelante, intentando rebatir nuestra propia hipótesis.

Eso no es difícil. Los átomos de cloro se combinan también de dos en dos, dando Cl_2, de peso molecular 71, que es netamente inferior al peso atómico del criptón; y, sin embargo, el punto de ebullición del cloro es justamente doble que el del criptón.

Así que, al construir nuestras teorías, será mejor que no intentemos cruzar las fronteras interfamiliares. En el resto del artículo me atendré a las familias, y sólo pondremos nuestra atención en anomalías dentro de ellas.

Pero veamos. ¿Son sólo los puntos de ebullición los que varían continuamente con el peso atómico (o molecular)? ¿Es la relación siempre directa, de modo que la magnitud aumente cuando lo haga el peso? Consideremos una tercera familia, bien definida, de elementos: la de los «metales alcalinos», y esta vez tomaremos los puntos de fusión.

TABLA 3

Elemento	Peso atómico	Punto de fusión (ºK)
Litio (Li)	6,9	452
Sodio (Na)	23,0	371
Potasio (K)	39,1	337
Rubidio (Rb) ..	85,5	312
Cesio (Cs)	132.9	301

El punto de fusión del cesio desciende a 301°K ó 28,5°C, lo que significa que se fundirá en un día caliente de verano. Hay todavía un sexto metal alcalino, el francio, que es radiactivo, cuya variedad nuclear más estable (peso atómico 223) tiene una vida media de sólo 21 minutos. Su punto de fusión no está determinado, pero podemos apostar a que andará, muy probablemente, por los 290° K, y que se fundiría un día agradable de primavera.

Hay otras propiedades que varían de este modo regular, con el peso atómico, dentro de las familias de elementos, subiendo continuamente a veces y otras bajando [0]. Pero la pregunta inmediata es si esta feliz regularidad se registra también en las familias de compuestos; es decir, de moléculas formadas por más de una clase de átomos.

Consideremos moléculas compuestas de carbono e hidrógeno. Se presentan en muchas variedades, pues los átomos de carbono pueden ligarse en cadenas y anillos.

Supongamos, pues, un solo átomo de carbono, combinado con hidrógeno; una cadena de dos carbonos, combinados con hidrógeno; una cadena de tres carbonos, cuatro, etc. Cuanto más larga la cadena, mayor será el peso molecular, y a esa serie de moléculas de la misma especie, cada vez más largas, podemos considerarla una familia.

¿Qué pasa entonces?

TABLA 4

Compuesto	Peso Molecular	Punto de ebullición (°K)
Metano (CH_4) ...	16,0	111,7
Etano (C_2H_6) ...	30,1	184,6
Propano (C_3H_8)	44,1	228,7
Butano (C_4H_{10}) .	58,1	273,7
Pentano (C_5H_{12})	72,2	309
Exano (C_6H_{14}) ..	86,2	341

Vemos que en este caso el punto de ebullición sube continuamente con el peso molecular.

Cierto que en la familia de «hidrocarburos» de la Tabla 4 todos los miembros tienen sus moléculas compuestas de los mismos elementos. ¿Será posible formar familias en que, de miembro a miembro, cambie al menos un elemento?

El carbono es el primer elemento de una familia, en que los tres restantes, por orden de pesos atómicos, son el silicio (Sí), el germanio (Ge) y el estaño (Sn). Cada átomo de esos otros tres elementos puede combinarse con cuatro hidrógenos, para formar compuestos bien conocidos (silano, germano, estannano, respectivamente), análogos al metano. La Tabla 5 muestra lo que ocurre entonces con los puntos de ebullición, y se ve que en esta familia hay también regularidad.

TABLA 5

Compuesto	Peso Molecular	Punto de ebullición (°K)
Metano (CH_4) ...	16,0	111,7
Silano (SiH_4)	32,1	161,4
Germano (GeH_4) .	76,6	184,7
Estannano (SnH_4)	122,7	221

Así, pues, quizá el problema de averiguar por qué el agua líquida tiene el más alto margen de temperatura se nos facilite si trabajamos con alguna familia de compuestos a que ella pertenezca.

La molécula de agua se compone de átomos de hidrógeno y de oxígeno (H_2O). El elemento hidrógeno es un solitario, que no pertenece a ninguna familia claramente definida (aunque tiene cierta relación a la vez con los halógenos y los metales alcalinos). En cambio el

[0] Es justo reconocer que no siempre se encuentra una variación rigurosamente continua; hay excepciones. Sin embargo, los químicos modernos suelen saber explicarlas; en este mismo capítulo veremos un ejemplo.

oxígeno es el primer miembro de una familia que comprende, como miembros restantes, el azufre (S), selenio (Se) y teluro (Te). Un átomo de cada uno de esos tres puede combinarse con dos de hidrógeno, formando moléculas (H_2S, H_2Se y H_2Te, respectivamente), de estructura parecida a las moléculas de agua.

TABLA 6

Compuesto	Peso molecular	Punto de ebullición (° K)
Agua (H_2O)	18,0	373,2
Ácido sulfhídrico (H_2S) ...	34,1	213,5
Ácido selenhídrico (H_2Se) .	81,0	231,7
Ácido telurhídrico (H_2Te)	129,6	271,0

Si nos fijamos sólo en los tres últimos miembros vemos que el punto de ebullición sube con el peso molecular. Pero ¡con el agua eso no reza! A juzgar por los restantes, su punto de ebullición debería andar por los

200° K ó —73° C. Sólo los días polares más fríos llegarían a condensar su vapor; y en cambio ahí la tenéis, hirviendo a una temperatura 170 grados más alta de lo debido. Lo dicho: «agua caliente».

Hay otros dos compuestos que, como el agua, no se ajustan a la línea de su familia.

Un átomo de hidrógeno se combina con otro de cualquiera de los halógenos, dando: ácido fluorhídrico (HF), ácido clorhídrico (HC1), ácido bromhídrico (HBr) y ácido yodhídrico (HI). Los puntos de ebullición de los tres últimos, en la escala absoluta, son: 188,2°, 206,5° y 237,8°, respectivamente. Podría esperarse que el HF tuviese su punto de ebullición a unos 170°, pero nada de eso; lo tiene a los 292,6°, o sea, unos 120° «demasiado alto».

O también, tres átomos de hidrógeno se combinan con un átomo de una familia de elementos que comprende el nitrógeno (N), el fósforo (P), el arsénico (As) y el antimonio (Sb). Los compuestos, llamados fosfamina (H_3P), arsenamina (H_3As) y estibamina (H_3Sb), tienen sus puntos de ebullición a 185,5°, 218° y 256°. Según eso, el primer miembro de la serie, el amoniaco (H_3N), debería hervir a unos 150°; pero nada de eso; su temperatura de ebullición es 239,8; es decir, unos 90° «demasiado alta».

Pues ¿qué tienen de común esos tres compuestos, de punto de ebullición demasiado alto: el agua (H_2O), el amoniaco (H_3N) y el ácido fluorhídrico (HF)?

1.° Los tres tienen moléculas compuestas de hidrógeno y otro elemento.

2.° Esos otros átomos, oxígeno, nitrógeno y flúor, ocurre que son precisamente los elementos más electronegativos que hay; es decir, los átomos más aptos para arrebatarles electrones a otros.

Un átomo de flúor, el más electronegativo de todos, puede, por ejemplo, arrancarle por completo un electrón a un átomo de sodio, asumiendo su exclusiva propiedad y dejando al sodio con un electrón de menos.

El átomo de hidrógeno no es tan fácil de despojar. Se aferra a su único electrón, más que el átomo de sodio al más externo de los suyos. El flúor no se lleva del todo el electrón del hidrógeno, pero se queda de él con «la parte del león». El electrón queda, por decirlo así, más cerca del centro del átomo de flúor que del centro del átomo de hidrógeno.

Eso significa que si trazamos una línea por el centro de la molécula de ácido fluorhídrico, con el átomo de hidrógeno a un lado y el de flúor a otro, el lado del flúor, por tener más participación electrónica de lo equitativo, posee lo equivalente a una pequeña carga

eléctrica negativa; mientras que el lado del hidrógeno tiene una carga positiva, igualmente pequeña.

Algo por el estilo puede decirse de las moléculas de agua y de amoniaco. En ellas el lado de los átomos de hidrógeno lleva una pequeña carga positiva; mientras que la parte del oxígeno o del nitrógeno la lleva negativa.

Esas tres moléculas son «moléculas polares»; es decir, tienen polos, en los cuales se concentran cargas eléctricas.

No es ése el caso en el H_2S, por ejemplo; que por lo demás es tan semejante al H_2O en estructura. Es que el azufre no es tan electronegativo como el oxígeno, y no puede participar, más que en forma equitativa, de los electrones de los átomos de hidrógeno. Por eso el ácido sulfhídrico no es marcadamente polar, ni el ácido clorhídrico, ni la fosfamina.

Consideremos ahora esas moléculas polares con un extremo cargado positivamente y el otro negativamente.

Es inevitable sospechar una atracción entre ellas. Si el extremo positivo de una molécula cae cerca del negativo de otra de la misma especie, ¿no se pegarán un poco?

Claro que sí; tanto más cuanto que el extremo cargado positivamente tiene átomos de hidrógeno. ¿Por qué?

Porque el átomo de hidrógeno es el menor de todos, y su centro permite, por tanto, las máximas aproximaciones. La atracción entre dos cargas de signo contrario varía en razón diversa a la distancia; cuanto más cerca están, más se atraen.

Resulta, pues, que las moléculas de agua, de ácido fluorhídrico y de amoniaco son «pegajosas». Tienden a fijar el extremo positivo de una al negativo de otra, y se requieren, para separarlas, temperaturas notablemente más altas que si fuesen «no polares»; es decir, carentes de concentraciones de carga en sus extremos, y sólo las sujetasen las fuerzas de Van der Waals, mencionadas en el capítulo anterior[0].

Generalmente las moléculas de agua se representan con los átomos de hidrógeno unidos al átomo de oxígeno de la misma, por un trazo lleno, que representa un enlace químico ordinario, y unidos al átomo de oxígeno de una molécula vecina por líneas de trazos más largas, que indican la atracción electromagnética entre las cargas opuestas.

Como el átomo de hidrógeno está, pues, entre dos de oxígeno, uno de su molécula y otro de una próxima (o bien, análogamente, entre dos átomos de flúor, entre dos de nitrógeno, entre un átomo de nitrógeno y uno de oxígeno, etc.), esa situación suele denominarse un «enlace de hidrógeno».

El enlace del hidrógeno sólo tiene como la vigésima parte de la fuerza que un enlace químico ordinario; pero basta para elevar en 170° la temperatura necesaria para separar las moléculas y hacer hervir el agua. Gracias al enlace del hidrógeno, las moléculas de agua son lo bastante pegajosas para hervir a 373° K, en vez de a 200° K; lo cual, unido al hecho de que el hidrógeno y el oxígeno son los dos átomos activos más abundantes del Universo, hace posible que exista un océano líquido en un planeta a las temperaturas terrestres.

Es más, gracias a que son pegajosas sus moléculas, le es posible al agua absorber tanto calor por cada grado que aumenta su temperatura, y ceder otro tanto por cada grado que desciende. Decimos, pues, que el agua tiene una excepcional «capacidad calórica».

Análogamente hay una excepcional absorción de calor en los puntos de fusión y ebullición, debida a la necesidad de romper todos esos enlaces del hidrógeno. Es decir, que

---

[0] Las fuerzas de Van der Waals resultan también de asimetrías eléctricas en átomos y moléculas, que concentran momentáneamente las cargas en uno u otro punto. Pero en las moléculas no polares, el corrimiento de las concentraciones de un sitio a otro determina polarizaciones diseminadas, de suma pequeñez, mucho menores, ciertamente, que las propias de las moléculas polares, cuyas concentraciones eléctricas son fijas y perfectamente localizadas.

exige mucho más calor del que podría esperarse el convertir hielo a 273° K en líquido a la misma temperatura, o convertir agua a 373° K en vapor a la misma temperatura. Procediendo a la inversa se desprende una excepcional cantidad de calor, cuando el vapor se condensa o el líquido se congela. En otras palabras, el agua tiene «calores latentes» excepcionales, «de fusión y vaporización».

Eso no es sólo cuestión de teoría. El agua actúa como una inmensa esponja del calor. En un cambio determinado de temperatura absorbe y cede más calor que cualquiera otra sustancia corriente; así que, bajo el influjo de la radiación solar, la temperatura del océano sube mucho más lentamente que la de la tierra, y en ausencia de insolación se enfría mucho más lentamente.

Gracias al vasto océano de agua en su superficie, la Tierra tiene, pues, una temperatura mucho más uniforme que sin él. En verano, el premioso calentamiento del mar obra como un mecanismo refrigerador, y en invierno su premioso enfriamiento actúa como una calefacción. Y si queremos ver lo que eso significa en la práctica, comparemos la oscilación de temperaturas, entre el día y la noche, y entre el verano y el invierno, en una tierra alejada de todo mar moderador (Dakota del Norte), con las de una tierra rodeada de mar por todas partes (Irlanda) .

Como a una temperatura cualquiera la evaporación de agua absorbe más calor por gramo que la de cualquier otro líquido corriente, el agua es un «acondicionador del aire» notablemente barato y eficaz.

El sudor es agua casi pura, y para evaporarlo hay que absorber gran cantidad de calor del objeto más próximo a ese agua, que es precisamente la piel en que está el sudor. De ese modo el cuerpo se refresca.

Réstanos hablar del agua como disolvente. En una sustancia como el cloruro de sodio (sal común), cada átomo de sodio pierde un electrón cediéndoselo a uno de cloro. Quedan los de sodio con una carga unidad, positiva, y los de cloro con una negativa, convertidos ambos en «iones». Las dos clases de iones se mantienen unidos por la atracción entre las cargas opuestas [0].

Cuando se echan en agua partículas de sal, la presencia de polos positivos y negativos en las moléculas de agua establece un campo que tiende a anular el establecido por los iones del cloro y del sodio. Esos iones se aglutinan, pues, con mucha menos fuerza en presencia del agua que al aire libre, y tienen marcada tendencia a apartarse y a moverse en el agua, por separado. Dicho brevemente, el cloruro de sodio se disuelve en el agua.

Lo mismo hacen una sorprendente variedad de compuestos electrovalentes, constituidos por iones de cargas opuestas, al modo del cloruro de sodio.

Los compuestos polares, que no están formados de verdaderos iones, pero tienen moléculas con concentraciones de carga separadas, como el agua misma, pierden también en el agua una parte considerable de su tendencia a aglutinarse y tienden, por tanto, a disolverse. En éstos se comprenden muchas sustancias corrientes, de importancia para la vida, que tienen el enlace oxígeno-hidrógeno o el nitrógeno-hidrogeno, que hacen posible la polarización, tales como, por ejemplo, varios alcoholes, azúcares, aminas y otros compuestos orgánicos.

Ningún otro líquido es un disolvente tan variado como el agua; ninguno puede disolver cantidades apreciables de una gama tan amplia de materias. Cierto que el agua no disuelve, en cambio, cantidades apreciables de todos los compuestos electrovalentes; pues la electrovalencia no es la única propiedad importante. Y claro que no puede disolver compuestos no polares, como los hidrocarburos, grasas, esteroles, etc.

La importancia de la variada acción disolvente del agua es la que sigue:

[0] La combinación cloruro de sodio es mucho más polar que la molécula de agua, lo cual se refleja en su extremadamente alto punto de ebullición.

Las sustancias más importantes del cuerpo, las proteínas y los ácidos nucleicos, juntamente con sus más importantes combustibles, los almidones y azúcares, están cargados de enlaces oxígeno-hidrógeno y nitrógeno-hidrogeno, y si no son polares del todo, tienen en sus moléculas importantes regiones polares. Tales compuestos pueden, pues, disolverse en agua, o al menos pueden acoplar internamente moléculas de agua a varias porciones de su estructura, experimentando cambios en relación con esas moléculas de agua asimiladas.

En una palabra, la química del cuerpo puede desarrollarse sobre la intimidad de un fondo de agua. Este fondo es tan esencial para la vida, tal como la conocemos, que la vida sólo podía razonablemente empezar en el océano; y ahora, aun donde está adaptada a la tierra firme, los tejidos siguen teniendo un 70 por 100 de agua.

Fijémonos, pues, en el agua. Consideremos las altas temperaturas de su fase líquida; su capacidad para servir de esponja del calor, moderadora de la temperatura y eficaz acondicionador de aire; su capacidad para disolver una amplia variedad de materias y, por tanto, para servir de medio en el cual puedan desarrollarse las reacciones necesarias para la vida; y podréis bien decir: «Seguramente esto no es casual. Seguramente el agua es una sustancia que ha sido preparada cuidadosamente para satisfacer las necesidades de la vida.»

Pero yo me temo que eso sea poner el coche delante del caballo. Empezó por existir el agua, como materia de ciertas propiedades, y la vida se desarrolló adaptada a esas propiedades. Si el agua hubiese tenido otras propiedades, la vida se hubiese adaptado a esas otras, al desarrollarse. Si el agua hubiese tenido un margen líquido más frío, se hubiese podido desarrollar la vida en Júpiter. Y si no hubiese existido en absoluto agua, la vida podría haber evolucionado adaptada a otra sustancia, del todo distinta.

En todos los casos, la vida habría evolucionado tan exactamente adaptada a lo que hubiese a mano, que cualquier ser vivo, lo bastante inteligente para analizar la situación con profundidad, se sentiría justificado para creer que respondía a un designio inteligente e intencionadamente sobrenatural, lo que, en realidad, estaba producido por las fuerzas ciegas y casuales de la evolución.

Y supongo que la simpática señora que me escribió, si hubiese osado leer atentamente este artículo, se sentiría justificada al aplicar a mi persona el pasaje bíblico.

Pero, ¿qué voy a hacerle yo? Yo pinto la situación como la veo.

11. El agua fría

Hace como medio año, caminaba yo, a toda prisa, por la gélida Nueva York. No había nieve en el suelo, pero hacía frío, y yo buscaba, a toda marcha, refugio. Al cruzar la calle, pisé la tapa de un registro, y al instante me encontré en íntimo y duro contacto con el suelo.

Fue la peor de mis caídas; y tendido allí todo a lo largo, mis pensamientos eran bien tristes, pues creí que me había roto la tibia izquierda; y en mis treinta y tantos años, nunca, hasta entonces, me había roto hueso ninguno. Debería haberme quedado quieto, esperando auxilio; pero no pude menos de hacer un esfuerzo y levantarme, por dos motivos:

Primero, porque me espoleaba la esperanza de que mi tibia estuviese entera, cosa que se confirmaría al ponerme en pie. Segundo, porque quería averiguar por qué me había caído, pues no soy nada inseguro de piernas.

En efecto, pude tenerme en pie; aunque mi pierna izquierda quedó rodilla abajo, bien malparada, el hueso estaba entero; ... pero mi traje, *mi mejor traje,* no. Advertí también, con más enfado que tristeza, que la tapadera del registro estaba cubierta de una fina capa de resbaladizo hielo. Lo que ocasionó mi caída fue que era tan transparente ese carámbano, que, a no fijarse mucho, la tapa parecía sin hielo e inocua.

Tuve que ir cojeando hasta el hotel, distante cuatro interminables manzanas; y no era ocasión entonces de pensar en lo ocurrido, con vistas a sacar de ello un ensayo. Voy a hacerlo ahora, que ya se me ha pasado bastante la rabieta. Atiende, caro lector.

Para los antiguos, una de las propiedades más notables del hielo, la más notable acaso, era precisamente la que había estado a punto de ser desastrosa para mí: su transparencia. Para los griegos el hielo era *krystallos,* de *kryos,* «frío»; así que la impresión más fuerte parece haber sido causada por su modo de formarse.

Pero más tarde se destacó otra propiedad y la palabra vino a significar más bien la transparencia que el frío.

Al cabo, cualquier cosa podía estar fría; pero en la antigüedad se conocían pocos objetos que fuesen sólidos sin ser opacos.

Por eso, cuando se descubrió el cuarzo y se vio que era transparente, sus trozos se llamaron también *krystallos* y fueron considerados, al principio, como una forma del hielo, que había estado expuesto a tan intenso frío, que había alcanzado solidez permanente e incapacidad para volver a derretirse.

Entonces el término sufrió un nuevo cambio de significado. Una propiedad importante del cuarzo transparente era su sorprendente regularidad de forma. Tenía caras planas que se encontraban en ángulos y bordes, netamente definidos. Por tanto, vino a llamarse *krystallos* cualquier sólido de geometría regular. De ahí proviene la palabra «cristal».

Sin embargo, quedan vestigios de su antigua significación de transparencia. Se habla aún de las «cristalinas esferas» donde estaban los planetas en la antigua cosmología de Ptolomeo. No era porque fuesen de cristal sólido, sino porque eran tan perfectamente transparentes que resultaban invisibles.

Y en los tiempos modernos, las adivinadoras, contemplando místicamente su esfera de vidrio, pretenden ver la suerte en su «bola de cristal». No es que la bola sea «cristalina» en el sentido moderno, pues es casualmente el vidrio uno de los pocos sólidos ordinarios que *no son cristalinos* ni, por tanto, verdaderos sólidos; pero es transparente.

Y, sin embargo, no es eso lo realmente asombroso del hielo. Parece presentarnos muchos misterios. Su simple existencia como «agua cuajada» puede parecerles no poco extraña y paradójica a los habitadores permanentes de los climas tropicales, y su frialdad y transparencia pueden parecer interesantes; pero todo eso nada supone, en realidad.

Fijémonos más bien en algo tan repetido que ha pasado a ser un tópico. ¿Quién no ha oído frases como ésta: «Los nueve décimos del contenido de esa observación estaban ocultos, como un iceberg»?

¡Como un iceberg!

Como no soy viajero, nunca vi un iceberg de verdad; pero si yendo yo en un buque apareciese uno a la vista (más vale que a distancia segura), de fijo que los pasajeros, reunidos en cubierta para contemplarlo, se dirían:

«Fíjate Maribel [o Pepe]: nueve décimos de ese iceberg están bajo el agua.»

Entonces contestaría yo: «Eso no es de extrañar, señoras y caballeros. Lo extraño es que sobresalga del agua un décimo de ese iceberg.» Naturalmente eso suscitaría una de esas miradas de estupor, que indicaría una vez más (¡y cuántas veces!) lo muy chiflado que les parezco a mis queridos semejantes.

Pero es verdad.

En general, la densidad de toda sustancia crece al bajar la temperatura. Cuanto más desciende la temperatura, con más lentitud se mueven las moléculas de un gas; con menos fuerza rebotan al chocar; más pueden aglomerarse, acercándose entre sí. Cuando la energía cinética de las moléculas del gas no basta para vencer las fuerzas de atracción entre ellas (véanse los dos capítulos anteriores), el gas se licua.

En los líquidos las moléculas están virtualmente en contacto, pero tienen energía bastante para deslizarse libremente unas sobre otras. También vibran y guardan mayor distancia entre sí que si todas estuviesen en completo reposo. Al bajar más aún la temperatura, las vibraciones pierden fuerza y amplitud y las moléculas se acercan un poco más. La densidad sigue aumentando.

Finalmente, la energía de vibración no alcanza a mantener las moléculas resbalando y deslizándose. Se establecen en lugares fijos y la sustancia se solidifica. Esta detención es más completa que la normalmente posible en la forma líquida; pero aún quedan vibraciones alrededor de la posición fija. Al seguir bajando la temperatura, esas vibraciones siguen amortiguándose, hasta reducirse a un mínimo a la temperatura del cero absoluto (—273° C).

Entonces es cuando es máxima la densidad.

En resumen, por regla general la densidad aumenta al bajar la temperatura. Hay un aumento brusco de densidad cuando el gas se licua[0], y otro, aunque menos brusco, cuando el líquido pasa a sólido. Eso implica que la forma sólida de una sustancia, siendo más densa que la forma líquida, no flotará en ella.

Por ejemplo, el hidrógeno líquido tiene una densidad de unos 0,071 gramos por centímetro cúbico; pero el hidrógeno sólido tiene una densidad de unos 0,086 gramos por centímetro cúbico. Si sumergiésemos completamente un centímetro cúbico de hidrógeno sólido en hidrógeno líquido, seguiría aún pesando 0,015 gramos y sería arrastrado hacia abajo por la gravedad; hundiéndose lenta, pero sensiblemente, contra la resistencia del líquido, alcanzaría el fondo de la vasija o el fondo del océano, si hubiese un océano de hidrógeno líquido.

Podríais creer que el hidrógeno sólido se derretiría durante su hundimiento, pero no haría tal, si el mar de hidrógeno líquido estuviese, como supondremos, a la temperatura de fusión.

Del mismo modo, el hierro sólido se hundiría en un mar de hierro fundido; el mercurio sólido en el mercurio líquido; el cloruro de sodio sólido en el cloruro fundido, etc. Eso es tan general que tomando al azar mil sólidos encontraríamos muy probablemente que todos ellos se hundirían en la fase líquida, y nos sentiríamos tentados a creerlo ley universal. Pero no lo es; existen excepciones.

[0] Excepto a la «temperatura crítica», que aquí no importa.

Y una de ellas, con mucho la más importante, es el agua.

A 100° C (su punto de ebullición a la presión normal) alcanza el agua su mínima densidad, aunque se conserva líquida. Su densidad es entonces de unos 0,958 gr. por cm^3. Al bajar la temperatura, la densidad aumenta: 0,965 a 90° C; 0,985 a temperaturas aún más bajas, y así hasta que a los 4° C llega a 1,000 g. por cm^3.

Dicho de otro modo, un gramo de agua tiene un volumen de 1,043 cm^3, a 100° C, pero se contrae hasta el volumen de 1,000 cm^3, a los 4°C.

Juzgando por lo que ocurre con otras sustancias, tendríamos pleno derecho a esperar que ese aumento de densidad o disminución del volumen seguirá si la temperatura baja de 4° C. ¡Pero nada de eso!

La temperatura de 4°C [0] representa el punto de máxima densidad para el agua líquida. A temperaturas menores, la densidad comienza de nuevo a decrecer (cierto que muy poco), y al llegar a los 0° C es de 0,9999 g. por cm^3; de modo que un gramo de agua ocupa 1,0001 cm^3.

La diferencia entre las densidades a 0° C y a 4° C es insignificante, pero es «en sentido inverso», que es lo crucial.

A los 0° C el agua se congela, si le robamos más calor; y según lo que aprendemos en otras solidificaciones, tendríamos derecho a esperar un brusco aumento de densidad. ¡Nos equivocaríamos! Hay una *brusca disminución de densidad.*

Mientras que el agua a 0° C tiene, como he dicho, una densidad de 0,9999 g. por cm^3, se hiela a 0° C con una densidad de sólo 0,92 g. por cm^3. Si sumergimos completamente en agua 1 cm^3 de hielo, estando ambos a 0° C de temperatura, el hielo pesará —0,08 gramos, experimentando, por decirlo así, una gravitación negativa.

Subirá, por tanto, a la superficie del agua. El ascenso continúa hasta que sólo queda bastante hielo para desplazar un peso de agua líquida igual al suyo total. Como 1 cm^3 de hielo a 0° C pesa 0,92 gramos, resulta que cuando el hielo está flotando, el 92 por 100 de él está bajo el agua y el 8 por 100 encima.

Lo que podría esperarse, a juzgar por casi todos los demás sólidos sumergidos en su propia fase líquida, es que el 100 por 100 del hielo quedase sumergido y un 0 por 100 emergente. Resulta, pues, que, como dije antes, lo raro no es que quede sumergida tanta parte de un iceberg, sino que quede visible tanto; o mejor, que haya algo visible.

Mas esto, ¿a qué obedece?

Empecemos por el hielo. En el hielo corriente cada molécula de agua se rodea de otras cuatro, orientadas con gran precisión. El átomo de hidrógeno de cada molécula está apuntado al átomo de oxígeno de una vecina, y esa orientación se mantiene por la pequeña atracción electrostática implicada en el enlace del hidrógeno, que describimos en el capítulo anterior.

Ese enlace es débil y no basta para aproximar gran cosa las moléculas. Estas quedan, por tanto, anormalmente separadas, y construyendo un modelo a escala de la estructura molecular del hielo se ve que hay entre las moléculas espacios bastantes para constituir una formación muy finamente ordenada de «agujeros». Nada visible, entendámonos, pues los agujeros tienen un diámetro como de un átomo o dos.

Pero eso hace al hielo menos denso de lo que sería si las moléculas estuviesen más próximas.

Al subir la temperatura del hielo sus moléculas vibran y se mueven a distancias mayores aún, así que la densidad disminuye, alcanzando a 0° C el mencionado mínimo de 0,92 g. por cm^3. Pero a esa temperatura la vibración molecular ha llegado precisamente al punto en que equilibra a las atracciones entre las moléculas. Si se añade más calor, éstas pueden despegarse y resbalar libremente unas sobre otras; pero al deslizarse así algunas caen en los agujeros.

---

[0] 3,98 °C, para ser más exactos.

Al fundirse, pues, el hielo, la tendencia a disminuir la densidad por la mayor energía vibratoria es compensada y más que compensada por la desaparición de los agujeros. Por eso, a 0°C, el agua líquida es un 8 por 100 más densa que el agua sólida.

Pero ni aun en el líquido a 0° C ha desaparecido del todo la ordenación molecular laxa. Al subir aún más la temperatura, hay todavía una lenta desaparición de los escasos agujeros que quedan, y hasta los 4° C no quedan tan pocos que ya no pueden ejercer efecto dominante en la variación de densidad. A temperaturas superiores a los 4° C, la energía de vibración molecular aumenta y la densidad disminuye, «como es debido».

Todo encarecimiento de la importancia de esas anomalías de la densidad del agua es poco. Veamos, por ejemplo, lo que sucede en un lago de regular tamaño, durante un invierno frío.

La temperatura del agua va perdiendo su temple veraniego. Claro que el agua de la superficie es la que primero se enfría, se hace más densa y se hunde, lanzando hacia arriba el agua más caliente del fondo, para que pueda, a su vez, enfriarse y hundirse. De ese modo se enfría toda la masa del agua y llegaría a ponerse a 0° C, si la densidad siguiese creciendo continuamente al bajar la temperatura.

Pero tal y como es, cuando se alcanza la temperatura de 4° C, el ulterior enfriamiento del agua superficial la hace ¡ligeramente menos densa! *Ya no se hunde;* flota sobre el agua más caliente de abajo. El agua superficial sigue enfriándose hasta los 0° C, pero el calor abandona muy difícilmente los niveles bajos, donde el agua se mantiene a un poco más de 0° C.

Es, pues, el agua de la superficie la que se congela; y como el hielo es más ligero que el agua, queda flotando.

Si el tiempo frío dura lo suficiente, se hiela todo el agua superficial, formando una sólida cubierta de hielo, que puede llegar a ser muy espesa y fuerte, para satisfacción de los patinadores.

Pero el hielo es un buen aislante del calor, más eficaz cuanto más grueso. Cuanto más va espesando, con más lentitud pierden calor hacia el aire las capas profundas de agua, líquidas aún, y más se retarda el ulterior espesamiento del hielo. En suma, en un invierno de los normales en nuestra tierra, un lago grande nunca se hiela del todo, hasta el fondo mismo; gracias a lo cual los seres vivos que contiene pueden sobrevivir al invierno.

Es más, al volver el tiempo cálido es el hielo de la superficie el que soporta el embate de la insolación. Se derrite, dejando al descubierto el agua líquida inferior, de modo que todo el lago pasa de nuevo a líquido.

Pero, ¿qué sucedería si el agua fuese como otras sustancias? Al enfriarse habría un continuo hundimiento del agua más fría, aun la de 0° C, hasta que al fin todo el lago se encontraría a esa temperatura. Tendería a helarse en todos sus puntos, y todo el hielo formado cerca de la superficie se hundiría inmediatamente, mientras hubiese líquido debajo. Un invierno que, en las condiciones reales, sólo llega a cubrir un lago de una capa gruesa de hielo, lo congelaría por completo, de la superficie al fondo, si el agua se comportase como otras sustancias.

Y al volver la estación cálida se derretiría la superficie del lago helado, pero el agua formada aislaría del calor solar las capas más profundas. Cuanto más espesa fuese la capa de agua líquida, más debilitada llegaría la radiación solar al hielo inferior, y con más lentitud se fundiría éste. En un verano de los normales en la tierra, un lago helado del todo no llegaría a fundirse por completo; la mayor parte de él seguiría helado siempre.

Lo mismo pasaría con los ríos y con los mares polares.

Ciertamente, si el agua cambiase de súbito sus características de densidad, cada invierno vería formarse nuevos hielos, para hundirse en los abismos oceánicos y permanecer allí en

perpetua congelación. El mundo entero terminaría por ser una masa de tierras envueltas en hielo, con una tenue capa de agua en la superficie del océano tropical.

Aunque ese mundo, estando a la misma distancia del Sol que ahora, recibiese la misma cantidad de energía, sería un astro frígido, y la vida, tal como la conocemos, no se habría desarrollado. Resulta, pues, que la vida depende del enlace del hidrógeno, no sólo por los motivos expuestos en el capítulo anterior, sino también por la estructura laxa que le da al hielo.

Hay otro modo de colmar los agujeros del hielo, aparte de elevar la temperatura. ¿Por qué no oprimirlo sencillamente, mediante altas presiones? Cierto que exige presiones enormes el rellenar los agujeros, hasta que el hielo sea tan denso como el agua. (Encerrando agua herméticamente y haciendo que se congele, ejerce hacia afuera una presión igual a la precisa para comprimir el hielo hasta la densidad del agua, y el recipiente estalla.)

Pero en los laboratorios pueden producirse muy altas presiones. Hacia 1900, el físico alemán Gustavo Tamman empezó a aplicárselas al hielo, y a partir de 1912, el físico americano Percy W. Bridgman llevó las experiencias mucho más adelante.

De este modo se descubrió que hay muchas formas de hielo. En todo sólido hay una formación ordenada de las moléculas y siempre existe la posibilidad de lograr distintas variedades de ordenación, según las circunstancias. Algunas ordenaciones, por ser más compactas que otras, resultan favorecidas por las altas presiones y las bajas temperaturas.

Así, a temperaturas y presiones ordinarias, la única variedad que puede existir es el hielo corriente, que llamaremos hielo I. Más al aumentar la presión se encuentran otras formas: el hielo II, a temperaturas —35° C, y el hielo III, a temperaturas —35° C y —20° C.

Si se eleva aún más la presión, se forma el hielo V. (Hielo IV no hay; fue definido, pero resultó un caso de observación errónea y hubo que desecharlo, cuando ya estaba descubierto el hielo V.)

A presiones todavía más altas se forman el hielo VI y el hielo VII. Mientras que todas las demás formas de hielo sólo existen a 0° C o por debajo, el VI y el VII pueden existir sobre 0° C, aunque sólo a presiones enormes. A la de 20.000 Kg. por cm^2 (millón y medio de veces la presión atmosférica corriente), el hielo VII puede existir a más de 100° C, que es el punto de ebullición del agua en condiciones normales.

Todas esas formas del hielo a alta presión son más densas que el agua líquida, como era de esperar, porque en ellas los agujeros han sido aplastados. Ciertamente, de todas las formas del hielo conocidas, sólo el I o variedad ordinaria es menos denso que el agua líquida.

Resulta, pues, que si pudiese formarse en el mar cualquier forma de hielo distinta de la I, se hundiría hasta el fondo e iría acumulándose.

En una de sus excelentes novelas, Kurt Vonnegut supuso un mítico «hielo IX», que podría existir en los fondos oceánicos y que se formaba espontáneamente en cuanto existiese una pequeña cantidad como «semilla».

El protagonista tenía esa semilla, que naturalmente fue a parar al fondo del océano, para desencadenar la catástrofe final.

¿Hay realmente alguna probabilidad de que ocurriera eso? No. Todas las formas del hielo, salvo la I, pueden sólo existir a presiones enormes. Aun los dos hielos de menos presión, el II y el III, sólo son posibles a presiones más de 2.000 veces mayores que la atmosférica.

Aunque tales presiones pudiesen alcanzarse en el fondo del mar (que no pueden), faltaría el requisito de que la temperatura estuviese por bajo de —20° C (que no lo está).

Además es evidente que nadie puede llevar en el bolsillo otro hielo que el I. Si obtuviésemos cualquier otro y suprimiésemos la alta presión precisa para producirlo, ese hielo se expandiría instantáneamente hasta la forma I, con violencia explosiva.

Queda aún otra cosa que estudiar. Aunque el estado sólido de una sustancia puede existir, y a menudo existe, en variedad de formas cristalinas, los líquidos y gases no pueden; en ellos no hay, en general, formaciones ordenadas de las moléculas y en el desorden no caben variedades.

Pero en 1965, el científico soviético B. V. Deryagin estudió el agua líquida en tubos capilares muy finos, encontrando que a veces poseía propiedades sumamente extrañas. Por ejemplo, su densidad era 1,4 veces la normal en agua ordinaria; su punto de ebullición era extraordinariamente alto, y podría ser calentada hasta los 500° C, sin dejar de ser líquida; podía enfriarse hasta —40° C antes de convertirse en un sólido vítreo.

Esa comunicación suscitó gran desconfianza en Occidente, donde hay un escepticismo casi sistemático hacia todo descubrimiento surgido fuera del círculo encantado de las naciones prominentes en la ciencia del siglo XIX.

Mas cuando los americanos repitieron los experimentos de Deryagin, obtuvieron con sorpresa los mismos resultados, y hasta pudieron ver gotitas de la forma anómala del agua, tan pequeñas que sólo podían distinguirse al microscopio.

¿Qué había tras de esto?

Las moléculas del agua, al resbalar unas sobre otras, tienden a tomar la orientación del enlace del hidrógeno, como el hielo. Eso ocurrirá en volúmenes muy pequeños y en muy breves períodos, pero basta para hacer que el agua líquida se comporte como si constase de partículas ultramicroscópicas de hielo, que se forman y deshacen con gran rapidez.

Ese «hielo» nunca se forma en un volumen bastante grande, ni por tiempo suficiente, para que los agujeros tomen importancia y hagan que el agua sea tan ligera como el hielo; pero mantiene las moléculas de agua lo bastante separadas para permitir que se formen y deshagan enlaces del hidrógeno. El agua líquida es, pues, menos densa de lo que podría.

Pero supongamos que al agua se le aplica presión, de modo que sus moléculas estén forzadas a acercarse, mientras las orienta el enlace del hidrógeno. Con moléculas anormalmente próximas, ese enlace será mucho más fuerte que de ordinario, hasta acercarse a la fuerza de un enlace químico corriente. Molécula tras molécula irán entrando en posición y, gracias a las atracciones anormalmente intensas del enlace del hidrógeno, formarán una especie de molécula gigante, compuesta de moléculas pequeñas de agua.

Cuando elementos pequeños forman de ese modo una molécula gigante, se dice que se «polimerizan» y la molécula es un «polímero». Por eso la nueva forma de agua se llamó «agua polimerizada» y en abreviatura «poliagua».

En la poliagua las moléculas están en formación ordenada, a semejanza del hielo, pero en forma mucho más compacta y desde luego sin agujeros. Esa ordenación compacta de moléculas de agua no sólo produce una sustancia considerablemente más densa que el hielo, sino también considerablemente más densa que el agua líquida ordinaria.

Es más, por mantenerse las moléculas más apretadas, se precisa una temperatura muy superior a 100° C para apartarlas y hacer hervir la poliagua. También se precisa una temperatura muy por bajo de 0° C para separar las moléculas, lanzándolas al orden, menos compacto, del hielo corriente. Otras propiedades extrañas de la poliagua se explican también fácilmente por la compacta ordenación de las moléculas.

Al parecer, la poliagua no se forma por sobrepresiones corrientes, pero sí en el volumen constreñido de los finos tubos capilares. Enseguida los biólogos empezaron a pensar si no se formaría también en el volumen constreñido de las células en los tejidos, y si algunas de las propiedades de la vida no podrían atribuirse con máxima facilidad a la poliagua.

Me gustaría terminar aquí con este brillante descubrimiento y la aún más brillante especulación; pero no puedo, porque lo malo es que muchos químicos siguen escépticos en todo este asunto.

Quizá, después de todo, los investigadores hayan sido despistados por una posible disolución del vidrio en los tubos en que estudiaban la poliagua. Si no era agua pura lo que manejaban, sino pequeños volúmenes de solución del vidrio, todo caía por tierra.

Desde luego un químico preparó una solución de ácido silícico, cuerpo que podría formarse cuando el agua está en contacto con el vidrio, y halló que poseía las mismas propiedades que la poliagua.

Así que puede ocurrir que ésta sea una falsa alarma, después de todo.

12. Certidumbre de la incertidumbre

Una de las obras literarias que me hicieron leer en el bachillerato fue *El admirable Crichton,* de James Barrie. Reaccioné de un modo muy emocional, pero no es eso lo importante en este momento. Lo que interesa es que uno de los personajes, joven hidalgo tonto, llamado Ernesto, había pulido cuidadosamente una sentencia, que soltaba varias veces durante la representación.

Decía: «Al fin, no soy bastante joven para saberlo todo.»

Y siempre le contestaba alguno (el cabeza de familia, con impaciencia; alguna de las señoras, con displicencia; el discreto mayordomo, paternalmente): «Querrás decir que no eres bastante viejo para saberlo todo.»

Ernesto se sentía mortalmente frustrado, y yo también, porque sabía lo que él quería decir [0].

La sentencia se grabó en mi memoria, porque sucede que también la ciencia decimonónica era «lo bastante joven para saberlo todo». A poco de comenzar aquel siglo, el astrónomo francés Pedro Simón de Laplace había dicho: «Si en un instante determinado conociésemos la situación y velocidad exactas de todas las partículas del Universo, podríamos deducir por cálculos todo lo pasado y lo futuro del mismo.»

En otros términos, el Universo era perfectamente determinado, y yo que era un determinista convencido, me relamía de gusto al leer esa frase.

Claro que yo comprendía que realmente nosotros no conocemos la posición y velocidad exactas de todas las partículas del Universo, en ningún instante, y que estamos casi seguros de no conocerlas nunca. Pero *en principio* podríamos conocerlas y eso hacía al Universo completamente determinado, «en principio».

¿No era una sensación magnífica la de ser lo bastante joven para saberlo todo?

Mas, ¡ay!, nos hacemos más viejos y sensatos y el saber se nos escurre entre los dedos, dejándonos desnudos en un Universo frío y hostil. Yo las pagué todas juntas en 1936, cuando leí *Incertidumbre,* «serial» en dos partes de Juan W. Campbell júnior, en *Amazing Stories.*

Por primera vez en mi vida descubría que el Universo no era completamente determinado, ni podía serlo «ni en principio».

Hablemos, pues, de la «incertidumbre».

El principio fundamental es éste: el mero hecho de medir altera la magnitud medida.

El ejemplo más corriente para ilustrar eso es la medida de la temperatura de un recipiente de agua caliente. Lo más fácil es introducir un termómetro; pero si éste está a la temperatura del cuarto, como es probable, le robaría calor al agua, y cuando llega a marcar la temperatura, marcaría una ligeramente inferior a la que había antes de introducir el termómetro.

Esa dificultad podría soslayarse, si pudiésemos introducir el termómetro a la misma temperatura que tiene el agua. Pero, ¿cómo saber a qué temperatura hay que introducir el termómetro, sin haberla medido antes?

Claro que podría ocurrir que el termómetro estuviese ya a la temperatura debida, y eso lo conoceríamos en que al introducirlo en el agua seguiría marcando lo mismo.

El termómetro no ganaría ni perdería calor y el agua seguiría a la misma temperatura, y mediríamos esa temperatura verdadera y exacta.

---

[0] Quiere decir que los jóvenes «piensan» que lo saben todo; pero al ir haciéndose mayores y más sensatos, reconocen que no. ¡Es claro!

Y ni siquiera habría que confiarse a la pura casualidad. Podríamos, por ejemplo, realizar un «experimento mental», o sea un experimento concebible, pero que exige condiciones demasiado ideales y fastidiosas para ejecutarlas en la práctica. Podríamos dividir nuestra muestra de agua en varias partes separadas, todas a la misma temperatura.

Pondríamos en esas partes sendos termómetros, calentando previamente cada uno a una temperatura distinta, con intervalos de un grado. Uno de ellos señalaría la misma temperatura después que antes, y ésa será la temperatura verdadera y exacta del agua.

¡Bueno!, exacta y verdadera en grados enteros sólo.

Claro que eso es un simple detalle; podríamos operar con termómetros ajustados a diferencias de décimas de grado, o de centésimas o milésimas. En los experimentos mentales no hay casi límites para la precisión de nuestros aparatos; pero entonces siempre faltaría un nivel de precisión mayor.

Otro modo de afinar la precisión es emplear termómetros cada vez más pequeños. Cuanto menor sea un termómetro, menos calor podrá robar o ceder y menos perturbará la verdad de la medición. Midiendo con termómetros de distintos tamaños, hasta podríamos calcular qué temperatura señalaría uno de tamaño nulo.

Pero claro que para hacer un cálculo verdadero y definitivo de la temperatura del «termómetro sin tamaño» tendríamos que ser capaces de leer con infinita precisión las temperaturas señaladas por los distintos termómetros de tamaño finito, y no podemos hacerlo.

En suma, por varias razones, no puede lograrse una medida completamente exacta; siempre habrá un resto de incertidumbre, aunque pequeño.

Claro que podemos desdeñar esto como una sutileza puramente filosófica, sin importancia práctica. No podemos hacerla todo lo exacta que sea necesario. Si se agudiza la necesidad de precisión, bastará con hacer mediciones más precisas. La incertidumbre de la medida nunca será cero; pero (afirmaba el razonamiento antiguo) podemos hacer que se acerque a cero cuanto queramos.

Pero eso es cierto sólo si damos por sentado que podemos hacer muy pequeño el efecto de las operaciones de medición, sobre lo que se mide. Para ello el aparato medidor habría de ser muy pequeño, o al menos contener un órgano muy pequeño. Pero ¿y si hay un límite último de pequeñez, y al intentar medir alguna propiedad de un objeto de pequeñez límite tenemos que utilizar una pieza medidora tan grande como él o mayor?

O bien, suponed que al medir una propiedad de un sistema perturbamos otra propiedad, y que cuanto más exacta sea la medida de la primera más exageradamente perturbada resulta la segunda. Ganar precisión en un sitio, a costa de mayor imprecisión en otro, no es verdadera ganancia.

Considerad, por ejemplo, el electrón, que tiene una masa de $9{,}1 \times 10^{-28}$ gramos. Este es, que sepamos, un mínimo infranqueable de masa. Ningún objeto realmente dotado de masa tiene menos que un electrón.

Suponed, pues, que queremos medir algunas propiedades de un electrón, que vemos cruzar veloz. Recordando el gran principio de Laplace, queremos determinar situación y velocidad en un momento dado. Si lo conseguimos, aún nos quedará un paso enorme hasta nuestro objetivo final de averiguar la posición y velocidad de *todas* las partículas en un momento dado; pero el más largo viaje empieza con un primer paso. Para empezar, conformémonos, pues, con un electrón.

El modo normal de determinar la posición de cualquier objeto es recibir luz radiada por él, o lanzarle luz y recibir el reflejo. En suma, vemos el objeto y sabemos dónde está.

Un objeto corriente no resulta afectado apreciablemente por la luz que refleja; pero un electrón es tan pequeño, que podría ser fuertemente afectado por esa luz. Lo ideal sería, pues, utilizar un rayo muy débil de luz; tan débil que el electrón no sufriese un efecto apreciable.

Desgraciadamente hay un límite para la debilidad de la luz. Así como la masa se individualiza en ciertos corpúsculos, que no los hay menores, también lo hacen todas las formas de la energía. La menor cantidad de luz que podemos usar es un fotón, y si a un electrón intentamos lanzarle un fotón de luz ordinaria, la onda asociada con él es tan larga que «se lo salta» y no podemos verlo.

Tenemos que usar radiación de onda mucho más corta: un rayo X, o mejor uno y, y recibir el reflejo con instrumentos. ¡Magnífico! Pero cuanto más corta sea la onda, mayor será la energía contenida en el fotón. Si un fotón de rayos Y alcanza a un electrón, es como si lo cocease una mula. Sale rebotado quién sabe a dónde.

En otros términos: podemos determinar dónde está un electrón en un momento dado, pero la operación misma de localizarlo altera al mismo tiempo su velocidad, y determinar la velocidad de un electrón altera su posición.

Una medida simultánea de las dos, con una imprecisión en ambas tan próxima a cero como queramos, resulta ser imposible. Al menos nadie ha conseguido jamás idear un experimento mental que proporcione esa exactitud simultánea. Hasta Einstein lo intentó, y aun él fracasó.

En 1927 el físico alemán Werner Heisenberg formalizó esta idea, enunciando lo que llamó «principio de incertidumbre». Este es hoy admitido como una de las generalizaciones fundamentales del Universo físico, todo lo fundamental, universal e ineludible que pueda ser una generalización. En efecto, si hay certidumbre de algo en el Universo, es la «certidumbre de la incertidumbre».

Heisenberg expresó el principio en una ecuación que podemos explicar como sigue: simbolicemos la posición por *p* y el momento (que es la masa de un cuerpo por su velocidad) por *mv.* La incertidumbre en una medida suele expresarse por una mayúscula griega «delta», que es sencillamente un triángulo. La incertidumbre en la medida de posición es, pues, ρ p, y en la de momento ρ *mv.* La ecuación que expresa el principio de incertidumbre de Heisenberg es

$$(\Delta p)\,(\Delta mv) = \frac{b}{2\pi} \qquad [1]$$

El símbolo *h* es la constante de Planck y π (la letra griega «pi») es la bien conocida relación entre una circunferencia y su diámetro).

Si medimos la posición en centímetros, la masa en gramos y la velocidad en centímetros por segundo, el valor de *b* viene a ser 6,6256 X 10^{-27} erg. seg. El valor aproximado de π es el consabido 3,1416. Podemos, pues, expresar la ecuación [1], muy aproximadamente, por

$$(\Delta p)\,(\Delta mv) = 10^{-27} \qquad [2]$$

En cierto modo, la incertidumbre brota de la estructura granulosa del Universo; del hecho de que energía y masa se presentan en individualidades de cuantía fija, determinada en último término por la cuantía de la constante *h* de Planck. Si dicha constante fuese nula, no habría ninguna incertidumbre; si fuese muy grande, todo sería tan incierto que el Universo parecería caótico.

La situación es análoga a la de las fotografías de los periódicos, compuestas de puntos negros y blancos; o las imágenes de televisión, compuestas de rayas muy próximas. Cuanto más gruesos sean los puntos o rayas, más borrosas y pobres en detalles aparecerán las imágenes.

La «granulosidad» del Universo, representada por la constante de Planck, es bien fina: ¡demasiado! Tan fina, que antes del siglo XX nunca había sido notada. Siempre había parecido que todas las medidas podían afinarse cuanto lo permitiesen nuestro tiempo y

paciencia; y que, «en principio», podría conseguirse una precisión de ilimitada proximidad a la incertidumbre nula.

Ahora nuestra duda es si la granulosidad del Universo será tan fina que, aun hoy, en el siglo XX, esa finura pueda permitirnos ignorarla; si será o no un hecho de interés sólo filosófico, sin importancia para el hombre práctico, ni siquiera para los científicos técnicos.

Consideremos de nuevo la ecuación [2]. Heisenberg habló de incertidumbre en la medida del momento, y no de la velocidad, porque al crecer la velocidad de un cuerpo crece también su masa, y es natural tratarlas juntas. Pero la masa sólo varía apreciablemente a velocidades muy grandes; si las mantenemos pequeñas, digamos de 1.000 millas por segundo, podemos, sin demasiado error, considerar constante el valor de *m*.

Entonces podemos referirnos a la incertidumbre de la velocidad y no del momento, y escribir así la ecuación [2]:

$$(\Delta p) \cdot m \cdot (\Delta v) = 10^{-27} \qquad [3]$$

o, dividiendo por *m*

$$(\Delta p)\,(\Delta v) = \frac{10^{-27}}{m} \qquad [4]$$

He aquí una ecuación que nos permite calcular la incertidumbre en las medidas simultáneas de la situación y la velocidad de una partícula; precisamente el par de medidas que quería hacer Laplace. En las condiciones bosquejadas en la ecuación [4], es visible que no nos conviene determinar la situación con *demasiada* exactitud, porque eso echaría por tierra la medida de la velocidad. Tampoco conviene una velocidad demasiado exacta, a costa de la situación. Hagamos el honrado compromiso de atender igual a una que a otra, midiendo de manera que las incertidumbres de ambas resulten iguales. Con cada una por separado conseguiríamos más; pero del conjunto de las dos es imposible sacar mejor partido.

De las dos mediciones, la de la situación es la más imperativa. Es fácil ver que podríamos pasarnos sin conocer con exactitud la velocidad de un cuerpo; pero al menos, dice nuestro sentido común, queremos saber a toda costa dónde está. Pongamos, pues, en la ecuación [4] que las incertidumbres en posición y en velocidad son iguales (numéricamente sólo, pues las unidades serán siempre distintas). Eso nos da

$$(\Delta p)^2 = \frac{10^{-27}}{m} \qquad [5]$$

o sea

$$\Delta p = \frac{3{,}2 \times 10^{-14}}{\sqrt{m}} \qquad [6]$$

Vamos a operar con la ecuación [6]. Como estamos midiendo las masas en gramos, calcularemos la incertidumbre que entraña el medir la situación y velocidad de 1 gramo de masa. (No es masa grande 1 gramo; viene a ser 1/28 de onza).

Si ponemos *m* = 1, la incertidumbre en la posición, según la fórmula [6], resulta ser de 32 X 10^{-14} centímetros. Otro medio de expresar esa incertidumbre es escribir 0,000.000.000.000.032 centímetros.

Ni las actuales técnicas hacen posible localizar un gramo de masa con tal precisión, ni nadie en su sano juicio pediría tanta exactitud para ningún fin práctico. Pero es importante

recordar que, por mucho que afinemos nuestras medidas, mucho tiempo que invirtamos e ingenio que despleguemos, es imposible medir la posición de 1 gramo de masa, con un error de menos de 0,000.000.000.000.032 centímetros; al menos sin introducir una incertidumbre mayor en la velocidad, y Laplace. No lo olvidéis, requería ambas cosas.

«¡Bueno!», contestaréis; «pero 0,000.000.000.000.032 centímetros es bastante aproximación. Si lográsemos la misma para todas las partículas del Universo y sus velocidades, todavía podríamos calcular, hacia atrás o hacia adelante, hasta un pasado o futuro remoto.»

¡Ah!, pero esta incertidumbre inevitable de 000.000.000.000.032 centímetros es para 1 gramo de masa.

Si miráis la ecuación [6], veréis que, al disminuir la masa tiene que aumentar ρ p. En la Tabla 1 he reseñado, como ejemplos, las incertidumbres correspondientes a algunos objetos de masa mucho menor de 1 gramo.

Como veis, la granulación del Universo parece ser lo bastante fina para que nos despreocupemos de la incertidumbre, aun en el caso de objetos microscópicos ordinarios. No debemos ciertamente quejarnos, si podemos fijar la situación de una bacteria con sólo una incertidumbre de 3 cienmillonésimas de centímetro.

Tabla 1 - EJEMPLOS DE INCERTIDUMBRES

Objeto	*Masa aproximada (gramos)*	*Incertidumbre en la situación (centímetros)*
Ameba ...	4×10^{-6}	0,000.000.000.016
Bacteria ...	1×10^{-12}	0,000.000.032
Gene	4×10^{-17}	0,000.005
Átomo de uranio	4×10^{-22}	0,0016
Protón ...	$1,6 \times 10^{-24}$	0,025
Electrón ...	$9,1 \times 10^{-28}$	1,1

Sólo cuando descendemos por bajo de lo simplemente microscópico, para acometer lo atómico y subatómico, nos encontramos en verdadero apuro. Sólo entonces el principio de incertidumbre se convierte en algo que no puede menospreciarse como meramente académico.

En realidad, en el extremo inferior de la escala, la situación es peor aún de lo que parece en la Tabla 1. Podríamos consolarnos diciendo que hasta un protón se lo caliza con un error de 1/40 de centímetro, imprecisión nada terrible; y que sólo el electrón nos da guerra.

Pero, ¿por qué usar una unidad arbitraria y fija de longitud como el centímetro? ¿Por qué no adecuar la unidad al objeto, tomando el diámetro de éste como unidad de la incertidumbre de situación? La conveniencia de esto último es obvia. Si tú mismo cambias de lugar una centésima de centímetro, es una insignificancia, y un observador corriente, ni nota ese movimiento, ni le importa. Mas si una ameba se traslada otro tanto, ese recorrido es su propio diámetro, y cualquiera que la observe al microscopio, verá su movimiento y lo encontrará altamente significativo. Preparé, pues, la Tabla 2.

Desde este punto de vista, los acontecimientos a nivel atómico son terriblemente, desatinadamente inciertos.

Si intentamos ignorar la incertidumbre a nivel atómico y subatómico, obtenemos resultados sencillamente grotescos. Nos es imposible asimilar las partículas subatómicas a diminutas bolas de billar, porque nunca podemos fijar la situación de cada minúscula bola. Lo

más a que llegaremos, aun resignándonos a aumentar terriblemente la incertidumbre de la velocidad, es a imaginárnoslas como objetos de contornos borrosos.

Podríamos también hablar de una partícula que existe, pero que no se puede descubrir como partícula; y suponer que tiene una determinada probabilidad de estar aquí, o allí, o en el otro lado. Por eso es tan útil suponer que las partículas tienen propiedades ondulatorias. La onda no sólo ocupa lugar y parece «borrosa»; además las ecuaciones que describen las ondas, describen también la probabilidad de que la partícula ocupe este o aquel punto del espacio.

TABLA 2 - OTRAS INCERTIDUMBRES

Objeto	Diámetro aproximado en centímetros	Incertidumbre de posición en diámetros
Ameba	0,016	0,000.000.011
Bacteria	0,000.1	0,000.3
Gene	0,000.003.4	1,5
Átomo de uranio .	0,000.000.01	160.000
Protón	0,000.000.000.000.1	250.000.000.000
Electrón	0,000.000.000.000.01	11.000.000.000.000

Respecto al nivel subatómico, es tan tosca la granulación del Universo que no tenemos modo de formarnos una imagen significativa de la estructura atómica, utilizando analogías con el mundo corriente, en que la granulación del Universo aparece tan fina, que puede ser por completo ignorada. Lo más que podemos hacer y lo que hago yo siempre, por ejemplo, es presentar simplificaciones incorrectas, en la esperanza de que no despisten demasiado.

Claro que si el Universo es granuloso, sería interesante encontrar trazas de esa granulación, también en gran escala, y no sólo entre protones y electrones.

Podemos ciertamente imaginar situaciones a gran escala, en que se ponga de manifiesto el principio de incertidumbre. Una tal situación se describe en la excelente obra de Milton A. Rothman, titulada *The Laws of Physics* (Basic Books, 1963).

Imaginemos, dice Rothman, una caja cerrada, en perfecto vacío, fuera de dos bolas elásticas exactamente esféricas. La caja está aislada del todo; no la alcanzan, pues, vibraciones mecánicas de ninguna clase, ni hay diferencias de temperatura entre sus distintos puntos; nada. La única fuerza que en ella actúa es la gravedad.

Sujetemos a su fondo una de las bolas y dejemos caer la otra exactamente en su «ápice» o punto más alto; entonces, según las leyes de la mecánica clásica, la bola móvil rebotará verticalmente hacia arriba; caerá de nuevo sobre el ápice de la otra, volverá a botar hacia arriba y así siempre, muchísimas veces.

Pero el principio de incertidumbre nos dice que la bola no caería *exactamente* en el ápice mismo, por mucho cuidado que pusiéramos. Y aunque cayera en él, no podría haber seguridad de que lo alcanzase al segundo rebote. En cuanto el punto de choque se apartase, por poco que fuese, del ápice, la bola móvil subiría ya con ligerísima oblicuidad, y caería después aún más lejos del ápice de la fija; y experimentaría un rebote aún más oblicuo, etc. A los diez o doce saltos, dice Rothman, sería muy probable que la bola móvil ya no tocase siquiera a la fija, por muy sobrehumano esmero que hubiésemos desplegado en la primera puntería.

En parecida situación está una aguja, apoyada verticalmente en un punto matemático. Imaginémosla en equilibrio, colocada de punta, en un vacío absoluto, en una caja libre de vibraciones y diferencias de temperatura.

La aguja sólo permanecería en equilibrio sobre el punto matemático, si su centro de gravedad estuviese exactamente sobre ese punto. Pero, según el principio de incertidumbre, el centro de gravedad podría hallarse a cierta distancia de la verticalidad del punto de apoyo. En cuanto se apartase de ella, por poco que fuese, la gravedad la apartaría más aún, y caería. En suma, el principio de incertidumbre hace imposible equilibrar una aguja verticalmente sobre un punto matemático, aun en condiciones ideales y perfectas.

Pero esas son situaciones imaginarias. Se refieren, sí, a cuerpos grandes, pero en condiciones realmente impracticables. Pues bien, ensayemos otras cosas:

El cero absoluto, tal como nos inclinamos a concebirlo, es la temperatura a la que se anula la energía de movimiento de átomos y moléculas. Según esa idea, como cerca del cero absoluto hay que pensar que son sólidas todas las sustancias, las vibraciones moleculares irán amortiguándose, hasta quedar reducido todo a una completa y letal inmovilidad.

Pero esa es la noción de la física clásica, no de la moderna. En cuanto aceptemos el principio de incertidumbre, ya no podemos admitir una energía nula de movimiento, en ningún instante ni coyuntura. Si al cero absoluto los átomos estuviesen en real y verdadero reposo, sabríamos que su velocidad era exactamente nula. Pero nosotros nunca podemos conocer velocidades exactas; lo más que podemos decir es que al cero absoluto la energía de los átomos está a cierta distancia, muy pequeña, de anularse, y que los átomos siguen moviéndose, aunque muy poco.

Este ligero «movimiento en el punto cero» que les resta a los átomos y moléculas, aun al cero absoluto, representa una energía *mínima,* que no puede quitárseles sin quebrantar el inviolable principio de incertidumbre.

Por eso no puede haber temperaturas inferiores al cero absoluto, pero el contenido de energía al cero absoluto, aunque mínimo, *no es nulo.*

¿Produce esa energía mínima algún efecto observable?

Sí lo produce.

El cuerpo sólido cuyos átomos son separados con más facilidad, pasándolo al estado líquido, es el helio sólido.

Para esa fusión basta la energía mínima del cero absoluto; y resulta que, en condiciones ordinarias, *el helio permanece líquido aun al cero absoluto.* Para solidificarlo, hay que aplicar presiones considerables.

¿Encontráis esto demasiado esotérico aún? ¿Eso del cero absoluto y el helio líquido es una manifestación del principio de incertidumbre, demasiado especializada para impresionaros?

Pues veamos esto otro: Si no existiese el principio de incertidumbre, tampoco existiría el Universo, tal como lo conocemos; pues la existencia de todos los átomos, menos los de hidrógeno, depende de dicho principio.

Pero ¡ay! Se me acabó el espacio. Dejémoslo para el capítulo siguiente.

13.A espaldas del maestro

Al escribir estos capítulos en su primitiva forma, he adquirido varias malas costumbres. En parte ha sido porque soy naturalmente propenso a las malas costumbres; y en parte porque, con tanta libertad como me dan, es difícil no malcriarse.

Por ejemplo, cuando se me acaba el espacio, y me siento travieso, corto en lo más interesante, indicando que hay más del asunto, y que ese resto lo reservo para otra vez. Después, a veces escribo lo que falta y a veces no. Depende de mi realísima gana.

Otra mala costumbre es la de llamar siempre a mi simpático auditorio «gentiles lectores» [*]. El epíteto gentil surgió, claro, para indicar que los lectores eran de procedencia hidalga y acaso noble. En nuestra igualitaria sociedad el término ha perdido su acepción aristocrática, y no puede uno menos de entender que los «gentiles lectores» son amables, cariñosos y dulces. Y lo son; pero me temo que no siempre.

Mí contumacia en la primera mala costumbre acaba de descubrirme una excepción al calificativo en que consiste la segunda.

Al aparecer por vez primera el capítulo anterior, terminaba cortado en lo más interesante.

A los pocos días recibí una carta de una fiera lectora [0]. Sin palabras amables por parte ninguna, arremetía contra mí, por haber osado cortar por la mitad la explicación del principio de incertidumbre. «¿Vendrá la continuación en el número siguiente?», tronaba.

Yo quise responder que no; que no tenía bastante meditada la continuación, y que ya me parecía bastante diligencia el despacharla en cualquier número de los dos años siguientes. Pero como ella estaba tan irritada, pensé que haría mejor en variar mis planes y escribir la continuación en seguida.

Me contestó con la latente amenaza de «más le valdrá».

Ya voy, querida señora, ya voy.

Para que esto no salga demasiado aburrido, proseguiremos la historia del principio de incertidumbre hablando primero de lo que parece un tema del todo distinto, al cual llamaré «la paradoja del núcleo atómico que no puede existir».

Hacia 1911, el físico neozelandés Ernesto Rutherford había demostrado concluyentemente la existencia del núcleo atómico, y durante los veinte años siguientes parecía establecida su estructura general. Se consideraba que los núcleos atómicos constaban de dos tipos de partículas: protones y electrones. Cada uno de los primeros llevaba una carga elemental positiva (+1); y cada uno de los otros una elemental negativa (—1). Los protones, existentes siempre en exceso, le comunicaban al núcleo, en conjunto, carga positiva.

La única excepción a esta regla general era el núcleo más sencillo de todos: el del isótopo más común del hidrógeno. Constaba de una sola partícula: un protón y nada más.

Como ejemplos de constituciones más complicadas, el isótopo más abundante del oxígeno tenía núcleos formados, según se pensaba, por 16 protones y 8 electrones, con carga neta de +8. El isótopo más común del hierro tenía núcleos formados por 56 protones y 30 electrones, con carga neta positiva de +26. El isótopo más corriente del uranio, núcleos de 238 protones y 146 electrones, con carga neta positiva de + 92, y así sucesivamente.

---

[*] Siempre hemos traducido «gentle readers» como «amables lectores». Aquí ponemos «gentiles» para que tenga sentido la procedencia que al epíteto le supone el autor. «Gentle» y «gentil» tienen la acepción de «distinguido» (gentleman; gentilhombre).—*(Nota del Traductor.)*

[0] Joven y sin duda guapa.

Aquello parecía lógico. Los protones del núcleo, todos ellos con carga positiva, se repelían, según la conocidísima regla: «cargas iguales se repelen». Pero si entre los protones se intercalan electrones estratégicamente, la atracción entre ellos y los protones («cargas opuestas se atraen») neutralizará las repulsiones, prestando coherencia al núcleo.

El electrón se consideraba como una especie de «cemento nuclear», y sin él parecía que no podía existir otro núcleo que el de hidrógeno.

Pero los físicos no estaban nada satisfechos con esos núcleos atómicos. Por ingeniosos cálculos se habían convencido de que protones y electrones tenían espines *, que podían caracterizarse por los números +1/2 ó —1/2.

Esto significaba que los núcleos con número par de partículas tendrían siempre un espín igual a la suma algebraica de un número par de mitades, positivas o negativas, la cual da siempre un número entero, tal como 1, 2, 3.

En cambio los núcleos con número impar de partículas tendrían como espín la suma de un número impar de mitades, que da siempre «semientero», como 1 1/2, 2 1/2, 3 1/2.

Desgraciadamente no ocurría así. Considerar, por ejemplo, el isótopo más corriente del nitrógeno: Constaba de 14 protones y 7 electrones, según parecer de los físicos de los felices años veinte; o sea veintiuna partículas, número impar; por lo que el núcleo del nitrógeno debería tener como espín total un «semientero»; pero no es así: Su espín es un número entero.

Algo había, pues, fundamentalmente erróneo. O los núcleos no tenían la estructura que se les atribuía, o fallaba la ley de conservación del momento angular.

Ante esta alternativa, los físicos no dudaron en su elección. Son especialmente aficionados a leyes de conservación de esto o aquello, y no ven con gusto que una se quebrante. Por tanto, empezaron a mirar con suma desconfianza toda la teoría protón-electrónica de la estructura nuclear.

Imaginaos, pues, el regocijo que conmovió al mundo de la física nuclear cuando, en 1932, el físico James Chadwick descubrió el neutrón, partícula de estrecho parecido con el protón, salvo que no tiene carga eléctrica.

Apenas se había enfriado el descubrimiento del neutrón, cuando el físico alemán W. Carlos Heisenberg, el mismo que había enunciado, años antes, el principio de indeterminación o incertidumbre, sugirió que los núcleos atómicos constaban de protones y neutrones; no de protones y electrones.

Así, el núcleo del isótopo más común del oxígeno constaría de 8 protones y 8 neutrones, y su carga neta seguiría siendo +8, gracias a los protones. (Los neutrones, por estar descargados, no aportarían carga propia, ni compensarían otras.) Del mismo modo, el núcleo del isótopo más común del hierro constaría de 26 protones y 30 neutrones (carga neta +26); el núcleo del isótopo más corriente del uranio, de 92 protones y 146 neutrones (carga neta +92), etc.

La teoría protón-neutrónica de la estructura nuclear podía explicar virtualmente todos los detalles del comportamiento nuclear, tan bien como los había explicado la teoría protón-electrónica. Pero además explica con deliciosa exactitud todo lo referente al espín nuclear. El núcleo del nitrógeno, por ejemplo, consta, según la nueva teoría, de 7 protones y 7 neutrones; total 14 partículas. Por tener un total par de partículas, es natural que su espín de conjunto esté representado por un número entero.

Estaba salvada, ¡viva el cielo! la ley de conservación del momento angular.

Pero había «caído en el vino una gigantesca mosca». Según la nueva teoría, los núcleos atómicos, salvo el del hidrógeno, no deberían existir.

---

* Spin (=giro) es palabra muy corriente del idioma inglés, que a ningún lector anglosajón le chocaría y que quizá por eso el autor no aclara con más detalle. Pero, en rigor, el concepto de espin (o spin) nada tiene que ver con un giro real en el espacio, sino que es un número cuántico.—(N. del T.)

Había desaparecido el cemento electrónico con que contábamos, para mantenerse los protones en pacífica vecindad. Ahora teníamos los neutrones, pero electromagnéticamente de nada servían. El núcleo estaba lleno de repulsión; repulsión fortísima y sólo repulsión.

Dentro del núcleo, dos protones están virtualmente en contacto, y por tanto sus centros distan como una diezbillonésima de centímetro. La carga de cada uno es enormemente pequeña, por los patrones corrientes; pero la distancia desde la que se repelen es muchísimo más pequeña aún. De modo que la repulsión entre dos protones vecinos asciende a unos 24 millones de dinas.

No es necesario decir que esa fuerza es sencillamente terrible, para estar concentrada en un par de cuerpos tan minúsculos como los protones; y si no hubiese fuerzas antagónicas, dos protones puestos en tan inmediata proximidad, estarían juntos un instante infinitesimal, para separarse luego a velocidades cercanas a la de la luz. Realmente, en 1932 no había modo razonable de explicar porqué dos protones podían permanecer tan próximos.

Como todos los núcleos atómicos, menos el del isótopo más corriente del hidrógeno, tienen dos o más protones en esa proximidad (con neutrones intercalados entre ellos, desde luego) resulta que en 1932 no había modo de explicar la simple existencia de la materia, fuera del hidrógeno.

Pero ante los hechos, aun los más vulgares, el más profundo y concluyente razonamiento teórico tiene que rendirse. La materia existe, luego hay algo que neutraliza v supera la repulsión entre los protones.

Desgraciadamente ese «algo» tenía que ser otra fuerza, y había escasez de fuerzas conocidas. Las que conocíamos en 1932 eran todas producidas por «campos de fuerza» de dos tipos.

Uno de ellos era el campo electromagnético, que gobierna la atracción y repulsión entre protones y electrones. La presencia de ese campo es lo que evita que entren en contacto los átomos, pues a distancias pequeñas, las capas electrónicas negativas que llenan los alrededores de cada átomo repelen a las del mismo signo que llenan los alrededores de otros. La mayor parte de las fuerzas que nos son familiares, los empujones y tirones de la vida corriente, se deben a que los átomos de dos trozos de materia, al acercarlos mucho, se repelen entre sí.

La única fuerza conocida en 1932, que no era de naturaleza electromagnética, era la del «campo gravitatorio»; pero estaba bien claro que la gravedad no puede, en modo alguno, contrarrestar la poderosa repulsión entre los protones del núcleo. Desde luego, entre esos protones se ejerce atracción gravitatoria, pues la gravitación sólo depende de la masa, es siempre atractiva y no es afectada por las cargas eléctricas. Mas, por desgracia, el campo gravitatorio es inconcebiblemente débil; mucho menos de un billón de trillones de veces más flojo que el campo electromagnético.

Si pudiésemos contraer al volumen de la Tierra la materia de 100.000 millones de galaxias (aproximadamente toda la del Universo conocido), la atracción gravitatoria de esa formidable concentración de masa, sobre un protón en su superficie, sería igual a la repulsión electromagnética, ejercida por otro protón, en contacto con él.

Pero son necesarios nada menos que 100.000 millones de galaxias, contraídas al volumen del globo terráqueo, y cuerpos así son «difíciles» de encontrar.

Se necesita otra cosa, algún tipo de campos de fuerza nuevos del todo. Eso nos daría una «fuerza nuclear», y si ha de mantener unido un núcleo, para hacer posible la materia distinta del hidrógeno, ha de poseer ciertas propiedades. En primer lugar, ha de ser más fuerte que el campo electromagnético, al menos de muy cerca; pues tiene que producir una atracción entre protones, más fuerte que su repulsión electromagnética.

Otra propiedad: Las fuerzas electromagnéticas y gravitatorias son ambas de largo alcance. Disminuyen desde luego con la distancia, pero sólo según el cuadrado de la misma.

En consecuencia, las fuerzas gravitatorias y electromagnéticas se hacen sentir en vastas extensiones de espacio. La hipotética fuerza nuclear no puede hacer tal cosa. Dentro del infradiminuto núcleo es de arrolladora intensidad; pero se amortigua rapidísimamente con la distancia; no según el cuadrado de ella, sino según una potencia mayor. A más de una diezmillonésima de centímetro de distancia (por ejemplo, a distancias mayores que los diámetros nucleares) se hace más floja que la repulsión eléctrica; y se hace insensible cuando la distancia llega a dos o tres diezbillonésimas de centímetro.

Así puede explicarse el hecho de que, a distancias subnucleares, los protones son fuertemente atraídos; pero no muestran señales de atracción en cuanto pierden contacto tan íntimo.

Pero, sin fundamento sólido, no vale inventar fuerzas nucleares de propiedades determinadas. Echamos de menos aquí terriblemente el testimonio claro de observaciones directas. Para encontrar alguno, sigamos el camino del principio de incertidumbre.

En 1930, en una reunión de físicos en Bruselas, Alberto Einstein se esforzó en descubrir un sofisma en el razonamiento que había conducido, tres años antes, al principio de incertidumbre. Como vimos en el capítulo anterior, este principio afirma que el producto de las incertidumbres en las determinaciones de posición y de momento era no menor que 1/6, aproximadamente, de la constante de Planck:

$$(\Delta p)\ (\Delta \mathrm{mv}) = 10^{-27} \qquad [1]$$

Einstein demostró que, sí eso era cierto, podría probarse que la misma relación cumple el producto de las incertidumbres intrínsecas en la determinación del contenido de energía (Δe) y en la medida del tiempo (Δt); es decir, que

$$(\Delta e)\ (\Delta t) = 10^{-27} \qquad [2]$$

Luego describió un experimento mental, en que energía y tiempo podían medirse a la vez con exactitud ilimitada, con tal de disponer de instrumentos perfectos de medida. Si Einstein tenía razón, caía por tierra el principio de incertidumbre.

El físico danés Niels Bohr pasó en vela aquella noche; y al día siguiente, macilento, pero triunfante, señaló algunos fallos en el razonamiento de Einstein, y demostró que en el experimento mental en cuestión, la medida exacta del tiempo imposibilitaba la de la energía, y viceversa. Einstein tuvo que reconocer, de mala gana, que Bohr tenía razón. Nunca ha vuelto a ser atacado seriamente el principio de incertidumbre.

Sin embargo, su versión einsteiniana, que liga la energía y el tiempo, es perfectamente correcta, e introduce algunos interesantes efectos.

Aplicando dicha versión, imaginad que estáis midiendo la energía que contiene cierto sistema en cierto instante. Si vuestra medida fija el contenido de energía en un instante matemático (de cero segundos de duración, exactamente), os será del todo imposible medir la energía. La incertidumbre de su medida es infinita entonces.

Mejor librados saldréis conformándoos con decir que la energía del sistema, durante cierto intervalo de tiempo, viene a ser ésta o la otra. Cuanto mayor sea el intervalo, con más precisión podréis medir la energía contenida.

Para un intervalo de una diezbillonésima de segundo, podréis idealmente medir la energía contenida en un sistema, hasta la diezbillonésima de ergio. En condiciones ordinarias, nadie podría pedir más.

Sin embargo, tal situación le impone cierta limitada flexibilidad al más importante principio establecido por la ciencia: al de «conservación de la energía».

Afirma este principio, que la energía contenida en un sistema cerrado tiene que mantenerse constante. No puede venir energía de la nada, ni perderse en ella. Pero si la energía contenida en un núcleo atómico la medimos, por ejemplo, para un intervalo de una diezbillonésima de segundo, la mayor aproximación con que podemos apreciarla es sólo hasta la diezbillonésima de ergio. Durante esa diezbillonésima de segundo, la energía contenida puede subir y bajar libremente, dentro de ese margen de una diezbillonésima de ergio, no obstante la ley de conservación de la energía. No habrá miedo de medir esa variación de la energía, ni por tanto de acusar al núcleo de haber quebrantado la ley.

Claro que podréis decir que no importa si notamos o no la violación de la ley; que la ley no puede ser violada, aunque no se note.

Pero ¿es así? Pongamos un ejemplo:

Figuraos que un severo maestro le prohíbe terminantemente a un alumno que le manifieste la menor descortesía, bajo pena de una paliza soberana. Supongamos que, en cuanto el maestro se vuelve de espaldas, el escolar le saca la lengua, pero consigue esconderla de nuevo antes de que el maestro se vuelva hacia él. Que el maestro sepa, el muchacho está portándose con perfecta cortesía en todo momento, y no quebranta la orden.

En otras palabras, una regla que de ordinario no puede quebrantarse podrá ser quebrantada, si se hace en tiempo lo bastante breve. Para aclarar esto, rectificaremos la regla, adaptándola, no a un inaccesible idealismo, sino a la situación real, tal como es. La orden no dirá:

«un alumno nunca debe ser descortés con su maestro.»

La orden es clarísimamente: «Un alumno nunca debe ser sorprendido siendo descortés con su maestro.» Todas las leyes humanas son de esta forma. Hasta un asesino queda impune, si nadie sospecha la comisión del crimen.

Análogamente, no debemos formular la ley de conservación de la energía diciendo: «La energía total de un sistema permanece constante en el tiempo», sino diciendo sólo: «La energía total de un sistema permanece mensurablemente constante en el tiempo.»

Lo que no podemos medir, tampoco podemos empeñarnos en gobernarlo por decreto; y el principio de incertidumbre nos dice hasta dónde podemos medir.

A la energía le es permitido variar en un determinado margen; y cuanto más breve sea el tiempo que dure esa variación, mayor será el margen de variación permitido.

¿Cómo puede influir esto en el campo nuclear?

Volvamos a Heisenberg. Cuando sugirió la estructura protón-neutrón del núcleo, vio muy bien la dificultad que dimanaba de la repulsión protónica. Sugirió que los campos de fuerza ejercen sus acciones atractivas o repulsivas por intercambio de partículas entre uno y otro cuerpo.

En el caso del campo electromagnético, la partícula cambiada sería el fotón (la unidad de energía radiante); y en el caso del campo gravitatorio, dicha partícula sería el gravitón (partícula que hasta ahora sigue siendo hipotética, pues jamás ha sido observada). Si ha de existir un tercer campo de fuerzas, un campo nuclear, tendrá que haber una tercera partícula intercambiable.

El físico japonés Hideki Yukawa se puso a investigar las propiedades de esa hipotética partícula nuclear intercambiable.

Dicha partícula existía en virtud del «hueco» que ofrece el principio de incertidumbre. Tenía energía, pero sólo la cantidad permitida por ese principio. Cuanto más breve fuese la duración de la partícula nuclear de intercambio, más energía podría poseer; era, pues, necesario fijar, como fuese, la duración de su existencia.

La partícula de intercambio tenía que durar lo bastante para ir y volver de un protón al inmediato. Si no, no duraría lo suficiente para producir fuerza atractiva entre los protones.

Tampoco debía durar mucho más que eso, pues no debía tener tiempo de salirse del núcleo, haciendo sentir las fuerzas nucleares en regiones externas, en que nunca habían sido notadas. Así, pues, la duración de la partícula, y por tanto su contenido energético, podían «acotarse» entre límites bastante próximos.

Supongamos que dicha partícula lleva la velocidad de la luz. Entonces hará el viaje de ida y vuelta al protón inmediato en unos 0,000.000.000.000.000.000.000.005 = 5×10^{-24} segundos.

Si medimos la energía para un intervalo no menor de 5×10^{-24} segundos, podemos determinar la energía adicional, que deja disponible, para la efímera partícula de intercambio, la flexibilidad que introduce el principio de incertidumbre en la ley de conservación de la energía.

Volviendo a la versión einsteiniana del principio de incertidumbre, pongamos como incertidumbre del tiempo $\Delta t = 5 \times 10^{-24}$. La ecuación toma la forma

$$(\Delta e)\,(5 \times 10^{-24}) = 10^{-27} \qquad [3]$$

Despejando Δe, hallamos que vale 0,0002 ergios. Esa es la cantidad de energía que deja disponible el principio de incertidumbre para la partícula de intercambio del campo nuclear. Es una cantidad enorme de energía para una sola partícula, y sería difícil manejarla como energía pura. Más convendría que, en su mayor parte, estuviese condensada en forma de masa, que es la más densa concentración de energía que se conoce. Una cantidad de energía igual a 0,0002 ergios puede condensarse en una partícula, de masa unas 250 veces mayor que la del electrón, más el remanente necesario para comunicarle una velocidad cercana a la de la luz.

Por eso, cuando Yukawa publicó su teoría en 1935, sugirió que la partícula nuclear de intercambio tiene masa, a diferencia del fotón y del gravitón, que carecen de ella; y que esa masa está comprendida entre la pequeña del electrón y las grandes del protón y el neutrón.

Estas últimas son unas 1.840 veces mayores que la masa del electrón; es decir, algo más de 7 veces mayores que la masa de la partícula de Yukawa.

Bien estaba idear una partícula de intercambio de determinadas propiedades; pero faltaba aún alguna confirmación experimental. Dentro del núcleo, la partícula de intercambio va y viene, en el margen de tiempo que impone el principio de incertidumbre. Eso significa que no puede ser observada de ninguna manera. Es una «partícula virtual», no real.

Pero suponed que le comunicamos energía al núcleo; energía bastante para las necesidades de la partícula de intercambio, sin tener que recurrir a la flexibilidad del principio de incertidumbre. En este caso ¿no tomará la partícula existencia real, consintiendo en tardar en desaparecer, tiempo suficiente para permitirnos observarla?

Lo malo es que no era fácil condensar la energía necesaria en los estrechos confines del núcleo. Por los años 30, la única fuente posible de energía lo bastante concentrada eran los rayos cósmicos. En 1936, estando estudiándolos el físico norteamericano Carlos David Anderson, observó que, en efecto, dichos rayos arrancaban en ocasiones partículas de núcleo, semejantes en masa a la partícula de intercambio de Yukawa. Esa masa resultó valer 207 veces la del electrón.

Anderson llamó a la partícula «mesotrón», porque en griego «meso» significa «intermedio»; pero pronto ese nombre se abrevió a «mesón».

Desgraciadamente, el mesón de Anderson no tenía las propiedades esperadas en la partícula de intercambio de Yukawa. Por lo pronto, ésta tenía que presentar fuerte interacción con los núcleos atómicos, y el mesón de Anderson no lo hacía; virtualmente ignoraba su existencia.

El desencanto de los físicos fue grande.

Más tarde, en 1948, un grupo de físicos ingleses, dirigidos por Cecil Francis Powell, al estudiar los rayos cósmicos en los Andes bolivianos, observaron otra partícula de masa intermedia. Tenía unas 270 masas electrónicas (casi un tercio más que la partícula de Anderson); y reaccionaba con los núcleos con la más satisfactoria avidez.

La nueva partícula fue llamada también mesón, y para distinguir los dos mesones, se introdujeron letras griegas como prefijos. El de Anderson era el «mu-mesón», pronto abreviado a «muón»; mientras que el de Powell era el «pi-mesón», pronto abreviado a «pión». Este pión es la partícula de intercambio de Yukawa.

Es el pión, con su existencia dentro del núcleo, el que hace posible el desarrollo de una fuerza nuclear atractiva, entre protones vecinos, más de cien veces más intensa que la repulsión electromagnética entre ellos. El que hace, pues, posible que exista materia distinta del hidrógeno. Y a su vez, la existencia del pión hace posible, «a espaldas del maestro», por así decirlo, el principio de incertidumbre.

¡Consecuencias de pretender demasiada certidumbre!

¿Y el muón? Si no es una partícula de intercambio, ¿qué es? Pues sabed que esa es una cuestión interesante; pues el muón ha suscitado dos problemas, que acaso sean los más fascinantes que suele plantearse el físico nuclear. Realmente no es ni siquiera un mesón. Es...

Pero ¡ay!, se me terminó el espacio. ¿Pasamos al capítulo siguiente?

14.La Tierra de Mu

Tenía yo unos catorce años, cuando vi en la biblioteca pública un libro que me pareció fascinante. Era *El continente perdido de Mu,* por James Churchward; me lo llevé muy ilusionado.

El desengaño fue amargo. Podría yo ser joven, pero no tanto como para no conocer los disparates. Fue aquel mi primer encuentro con la «literatura seria», desatada por la leyenda de la Atlántida (en contraste con la ficción científica honrada); y ya no esperé al segundo.

Si queréis saber más acerca del mito de la Atlántida, o de Lemuria, de Mu, etc., no lo busquéis aquí. Os remito a una obra interesante y divertida, de un caballero del más alto coeficiente de racionalidad que he conocido: *Lost Continents,* por L. Sprague de Camp (Gnome Press, 1954).

Por mi parte no entraré más en el tema, fuera de decir que la «Tierra de Mu» era un continente hipotético, que cubría el Océano Pacífico, y que, como la Atlántida, se supone hundido en el mar, después de albergar una avanzada civilización.

Pura quimera, claro; pero ya veréis qué extraña coincidencia ha motivado el nombre «Mu».

Cuando en 1926 escribió Churchward su primer libro sobre «Mu», no podía figurarse que vendría una época en que el término «Mu» tomaría cierta importancia en la ciencia. Esta importancia radica principalmente en los problemas que han surgido en relación con «Mu», los cuales, lejos de estar resueltos o en vías de solución, en el último cuarto de siglo vienen haciéndose cada vez más arduos y desconcertantes; y hoy, mediados los sesenta, los más inquietantes y refinados enigmas de la física nuclear se refieren justamente a Mu.

En cierto modo existe de veras una «Tierra de Mu», y es mucho más fascinante y misteriosa que el fosco continente hundido, de la nebulosa imaginación de Churchward.

Permitidme, amables lectores, que os hable de esa auténtica Tierra de Mu.

Como acostumbro, empezaré por el principio, que en este caso es un capítulo anterior, en que describí los esfuerzos hechos para explicar la existencia de los núcleos atómicos, a pesar de la fuerte repulsión mutua de los protones en ellos contenidos. Permitidme que repase un poco.

Para explicar la existencia del núcleo, el físico japonés Hideki Yukawa había considerado preciso postular que existe una partícula de masa intermedia entre el protón y el electrón. En 1936 se encontró una partícula intermedia, que fue inmediatamente llamada «mesotrón», del griego *meso,* que significa «en medio» o intermedio. Suprimiendo una sílaba se abrevió ese nombre a «mesón».

Desgraciadamente ese feliz descubrimiento tenía dos fallos. En primer lugar, el mesón resultaba algo ligero.

Eso, no obstante, podría acaso pasar; era fácil que se comprobase que había factores no tenidos en cuenta por Yukawa en su razonamiento.

Menos fácil de remediar era el otro defecto. La más importante propiedad del mesón era reaccionar muy rápidamente con los protones y neutrones del núcleo, para que les sirviese de cemento. Con un protón, por ejemplo, tenía que reaccionar en no mucho más de una trillonésima de segundo. Un chorro de mesones, incidiendo en un grupo de átomos, tenía que ser engullido al instante.

Más no ocurría eso. Un chorro de mesones, animado de gran energía, puede atravesar algunas pulgadas de plomo. Al hacerlo los mesones tienen que chocar con gran número de núcleos, sin ser absorbidos por ninguno.

Durante una docena de años esto enojó a los físicos.

Se había predicho una partícula, había aparecido, y resultó que no era la partícula predicha. Afortunadamente, en 1948 fue descubierto un nuevo mesón, de masa algo mayor que la del primero, y que reaccionaba en forma casi instantánea con los núcleos. Su identidad con la partícula predicha por Yukawa era patente, y desde entonces los físicos no han tenido motivos para dudarla.

Se hizo entonces necesario dar nombres distintos a los dos mesones, y un buen modo era utilizar, como prefijos, letras griegas, cosa muy usual en la ciencia.

Por ejemplo, el primer mesón tenía derecho preferente a llevar el prefijo «m», inicial de «mesón». La letra griega equivalente a «m» es «μ», que se lee «mu»[0]. Por eso el primer mesón, el que *no era* la partícula de Yukawa, se llamó «mu-mesón», y cada vez con más frecuencia, en abreviatura, «muón».

El segundo mesón, *que si es* la partícula de Yukawa, se descubrió primero en los productos del bombardeo, con rayos cósmicos, de la atmósfera superior («radiación primaria»). Debía, pues, llevar la inicial «p» de «primaria». La letra griega π, equivalente a «p», se llama «pi».

Por eso la partícula de Yukawa se denominó el «pi-mesón» o «pión»,

Llamando ahora 1 a la masa del electrón, comparemos la masa de ambos mesones, del protón y del neutrón. (Tabla 1.)

TABLA 1 - MASA DE LAS PARTICULAS SUBATOMICAS

Electrón	1
Muón ...	206,77
Pión ...	273,2
Protón ..	1.836,12
Neutrón	1.838,65

Fijándonos en ese grupo de partículas podemos decir que el átomo está constituido por un núcleo, que contiene protones y neutrones, soldados entre sí por piones, y que fuera del núcleo existen electrones. Hay, pues, cuatro diferentes partículas, todas esenciales en la estructura atómica.

Pero queda todavía el muón, el mu-mesón; partícula que podemos llamar, si nos sentimos lo bastante románticos, la tierra de Mu del físico. ¿Cómo actúa? ¿Qué función desempeña?

¿Me creeréis que hace ahora unos treinta años que se descubrió el muón, y que los físicos no saben todavía cómo actúa, ni qué función desempeña?

Ese enigma, el primero de la tierra de Mu, no inquietó tanto como podríais suponer. En los años cincuenta y sesenta se descubrieron docenas de otras partículas, y estaba pendiente de explicación la existencia y funciones de gran número de ellas; no sólo del muón.

Ahora lo que se hace sentir es la necesidad de una teoría general, que abarque todas las partículas subatómicas en conjunto. Hasta empiezan ya a lanzarse esas teorías generales, pero no es este capítulo lugar para explicarlas.

---

[0] El «continente de Mu» descrito por Churchward no tiene nada que ver con la letra griega «mu»; pero así y todo, yo aprovecho en este artículo la coincidencia.

Pero, respecto al muón, surgieron otros problemas que le afectan sólo a él, y no a ninguna otra partícula, y sobre los cuales los físicos no vislumbran aún ni sombra de respuesta.

Suponed que comparamos el muón con el electrón, por ejemplo:

1.° El electrón lleva una carga eléctrica negativa, tomada arbitrariamente como unidad; así que su carga se designa por —1. Tiene un gemelo con carga positiva, el positrón (carga +1). Pero no existe, por ninguna parte, un «electrón neutro» (de carga 0).

¿Debería existir? Veréis: hay un protón neutro (carga 0), que llamamos neutrón, un poquito mayor en masa que el protón (carga +1) y su gemelo el antiprotón (carga —1). Hay un pión neutro (carga 0), un poquito menor en masa que el pión positivo (carga +1) y su gemelo el pión negativo (carga —1).

Sin embargo, aunque pueden existir protones y piones sin carga, no hay, al parecer, electrones sin ella. Al menos jamás se ha observado un electrón neutro, ni hay razón teórica para sospechar que exista.

Veamos el muón. Hay un muón negativo (carga —1) y uno positivo (carga +1); pero no hay muones neutros.

Es más, en marzo de 1965, tres días antes de escribir yo esto, se publicó el resultado de un experimento, que consistió en disparar chorros de muones y electrones contra protones. De la forma de la dispersión, podía deducirse el volumen en que se repartía la carga eléctrica del muón o del electrón. No pudo apreciarse diferencia ninguna entre ambas partículas. Podemos, pues, afirmar que, en la clase y distribución de cargas, el muón no se distingue del electrón.

2° Las partículas efectúan una especie de giro sobre su eje, que llamaremos «espín» *. El espín de un electrón o positrón puede expresarse por +1/2 ó —1/2. También el espín de un muón, negativo o positivo, puede expresarse por +1/2 ó —1/2. Tampoco en el espín se diferencian, pues, el muón y el electrón.

3.° El espín del electrón o positrón crea un campo magnético, cuya fuerza viene a valer 1.001162 magnetones de Bohr. El espín del muón, negativo o positivo, crea un campo magnético de fuerza igual a 1,001162 magnetones de Bohr. La diferencia es completamente insignificante, y en el magnetismo tampoco, pues, se diferencian casi el muón y el electrón.

4.° El electrón y el muón pueden tomar, o no, parte en ciertas interacciones con otras partículas; por ejemplo:

a) Un pión es una partícula inestable que, abandonada a sí misma, se desintegra en un par de centésimas de microsegundo [0]. Al desintegrarse, puede producir un muón y un neutrino [0], o bien un electrón y un neutrino.

En suma, cuando se desintegra un pión negativo puede producirse o un electrón o un muón negativo; al desintegrarse un pión positivo puede producirse o un positrón o un muón positivo.

b) Un electrón tiene muy poca tendencia a reaccionar con núcleos atómicos; tiende a permanecer fuera del núcleo. Pues bien, muones negativos pueden reemplazar a los electrones en sus órbitas alrededor de núcleos, formando los llamados «átomos muónicos». E indudablemente muones positivos podrían reemplazar a los positrones, en sus órbitas alrededor de núcleos de antimateria, para producir «átomos antimesónicos».

c) Puede ocurrir que un electrón, y su gemelo con carga positiva el positrón, giren uno alrededor del otro, formando un sistema neutro, llamado «positronio». También puede girar el electrón en torno a un muón positivo, y no al positrón, formando un «muonio». Indudablemente un positrón podrá girar alrededor de un muón positivo, formando un cuerpo al cual, que yo sepa, no se le ha inventado aún el nombre (¿«mumuonio»?)

---

[0] El microsegundo es la millonésima de segundo, o sea, 10^{-6}segundos.

[0] De los neutrinos tendré que hablar más adelante en este artículo.

Podemos, pues, afirmar que en la naturaleza de las interacciones con otras partículas, que puedan ejercer electrones y muones, no hay diferencia entre ellos.

Por eso los físicos, al estudiar el muón más y más a conciencia, empezaron a vislumbrar que él y el electrón son idénticos.

Bueno, idénticos casi. Quedan dos importantes aspectos que los distinguen.

Comprende el primero la cuestión de la estabilidad.

El electrón y el positrón son estables ambos. Uno cualquiera de ellos, aislado en el Universo, no alteraría, que nosotros sepamos, su naturaleza, para convertirse en algo distinto.

Pero el muón es inestable. Aun aislado en el Universo, se desintegraría, después de una vida media de 2,2 microsegundos. Un muón negativo se desintegra en un electrón y una pareja de neutrinos; un muón positivo, en un positrón y una pareja de neutrinos.

Esto parece ciertamente una diferencia enorme entre el electrón y el muón; pero no lo es, aunque os extrañe. Un microsegundo es un intervalo de tiempo breve, a escala humana, pero no a escala subatómica. En ésta hay reacciones y desintegraciones que se producen en $10^{—23}$ segundos. En esos intervalos actúan las interacciones piónicas, que sirven para mantener conexo un núcleo atómico.

Si tomamos $10^{—23}$ segundos como un intervalo normal de tiempo, en la escala subatómica, corto, pero no demasiado, podemos equipararlo con un segundo en la escala humana. Entonces 10^{-6} segundos, que es *cien mil billones* de veces más largo que $10^{—23}$ segundos, equivaldría a *tres mil millones* de años en la escala humana.

Desde el punto de vista del tiempo subatómico, el muón dura miles de millones de años, o bien, «prácticamente por siempre».

La diferencia entre un electrón, que dura por siempre, y un muón, que dura prácticamente por siempre, no es lo bastante grande para preocupar a un físico.

Pero vosotros podéis ser más exigentes que los físicos. «Prácticamente siempre» no es «siempre», podéis exclamar; y seis mil millones de años no es la eternidad.

En ese caso, miradlo de esta otra manera: Cuando se desintegran las partículas subatómicas, tienden a formar partículas más ligeras, con tal de no quebrantar ninguna «regla del juego». Así, cuando se desintegra un muón negativo, forma el electrón, negativo, pero más ligero. La masa disminuye, pero la carga eléctrica se mantiene, porque las reglas del juego exigen que las cargas jamás desaparezcan.

Pero el electrón no puede desintegrarse, porque no existe partícula alguna, portadora de carga eléctrica, de menos masa que él. La carga tiene que conservarse, y, por tanto, también el electrón, forzosamente.

También el positrón permanece estable, porque no existe partícula alguna de menos masa, portadora de carga positiva.

(Claro que un electrón y un positrón pueden aniquilarse mutuamente, porque la carga negativa del primero anula la positiva del segundo. La carga conjunta del par, antes de la aniquilación, es —1 + 1 = 0; así que no hay destrucción de carga neta.)

En suma, el hecho de que el electrón dure siempre, y el muón sólo «prácticamente siempre» es debido por entero a la diferencia de masas. Podemos, pues, ignorar la diferencia de estabilidades, como efecto por completo secundario, y pasar a la diferencia de masas, que parece esencial.

El muón negativo tiene 206,77 veces más masa que el electrón; el positivo, 206,77 veces más masa que el positrón. Hasta 1926, todas las demás diferencias entre ambas series de partículas parecían proceder de esa diferencia de masas.

Un ejemplo es la diferente estabilidad del muón y el electrón. He aquí otro: Cuando un mesón sustituye a un electrón, en su órbita alrededor de un núcleo atómico, formando un

átomo mesónico, el mesón tiene que poseer el mismo momento angular que el electrón. El momento angular crece con la masa, y también con la distancia al centro de rotación. Como la masa del mesón es más de 200 veces mayor que la del electrón, tiene que compensar ese exceso de masa, acercándose proporcionalmente al centro de rotación (al núcleo). En los átomos de gran masa, que suelen mantener muy próximos sus electrones externos, el mesón, más cercano todavía, gira en realidad dentro del perímetro del núcleo. Eso de que el muón pueda circular libremente dentro del núcleo demuestra la poca tendencia que tiene a reaccionar con los protones y neutrones. (Además suscita desconcertantes problemas, sobre la naturaleza y estructura interior del núcleo.)

Así como los electrones de un átomo, al saltar de un nivel a otro de energía, suelen emitir o absorber fotones de luz visible, las mucho mayores masas mesónicas salvan desniveles energéticos mayores también.

Los fotones que esos átomos emiten o absorben son más de 200 veces más energéticos que los de luz visible, y están en la zona de los rayos X.

La peculiar estructura del átomo mesónico y su capacidad de emitir y absorber rayos X pueden, pues, considerarse como meras consecuencias de la gran masa del muón.

He aquí otro ejemplo: Un pión, al desintegrarse, puede formar un muón o un electrón. Podría suponerse que, si el muón y el electrón guardan perfecta analogía, ambos deberían tener igual probabilidad de formarse, y que resultarían tantos electrones como muones. Pero no es así. Por cada electrón formado, se forman 7.000 muones. ¿Por qué será?

Según la teoría de tales interacciones, la probabilidad de que se forme un muón o un electrón depende de lo que se aproxime a la velocidad de la luz la velocidad de la partícula formada. El electrón es una partícula muy ligera y, en el momento de formarse, es disparado casi a la velocidad de la luz. Pues bien; por faltarle tan poco para llevar la velocidad de la luz, es tan poco probable su formación.

Pero el muón, de masa 200 veces mayor, es, por tanto, mucho más inerte. Su velocidad al formarse es bastante menor que la velocidad de la luz, y la probabilidad de que se forme aumenta paralelamente. La diferencia entre el número de muones y el de electrones que se producen al desintegrarse un pión, resulta también consecuencia de la diferencia de masas.

Los físicos han comenzado, pues, a ver sólo en el muón negativo un «electrón pesado», y en el positivo un «positrón pesado». Y ese es el segundo enigma de la «tierra de Mu de los físicos». ¿Por qué será tanto mayor la masa del muón que la del electrón, y precisamente 206,77 veces mayor, ni más ni menos?

Nadie lo sabe.

Además, ¿por qué esa enorme diferencia de masas ha de influir tan poco en la carga, espín, campo magnético y tipo de interacciones experimentadas? Nadie lo sabe.

Pues ni siquiera eso es todo. He reservado para lo último el enigma más reciente e inquietante.

Existen unas partículas sin masa ni carga, llamadas neutrinos, que tienen por gemelos a los antineutrinos.

(Son opuestos en la dirección de sus campos magnéticos.) Tales partículas están especialmente asociadas a los electrones y positrones.

Cuando en el curso de la desintegración de una partícula se forma un electrón, se produce, al mismo tiempo, un antineutrino. Cuando se forma un positrón, se produce con él un neutrino.

Cuando en el curso de la desintegración de una partícula se forma un muón negativo, se forma también con él un antineutrino. Y claro que cuando se forma un muón positivo, lo acompaña un neutrino.

Al principio se pensaba que, puesto que el muón tiene mayor masa que el electrón, el neutrino producido cuando un muón debía tener mayor masa que el producido cuando un electrón, Por eso los físicos los distinguían, llamando «neutreto» al asociado con un muón.

Sin embargo, cuanto más detenidamente observaban el neutreto, menos masa le encontraban, hasta que al fin resolvieron que el neutreto no tiene masa.

Mas la única diferencia entre muones y electrones era la masa, y si esa diferencia se borraba entre el neutreto de unos y el neutrino de los otros, ya no cabían otras entre neutrinos y neutretos.

Ambos eran neutrinos (o antineutrinos). Los físicos resolvieron que el neutrino (o antineutrino) de muón, y el neutrino (o antineutrino) de electrón eran en todo la misma partícula. Esto parecía sólo otro ejemplo más de cómo el electrón y el muón no podían distinguirse, sino en la masa, y en propiedades derivadas de ella.

Pero quedaba otro problema. Cuando se desintegraba un muón negativo producía un electrón y *dos* neutrinos. Por consideraciones teóricas, era necesario considerar uno de ellos como neutrino, y el otro como antineutrino.

Pero un neutrino y un antineutrino deben ser capaces de aniquilarse entre sí, no dejando más que radiación electromagnética. En ese caso, un muón negativo debería desintegrarse formando un electrón, como única partícula; y un muón positivo debería desintegrarse formando, como única partícula, un positrón. Al menos eso debería observarse de vez en cuando.

Sin embargo, nunca se observaba. En la desintegración, tanto del muón negativo, como del positivo, siempre se formaban el neutrino y el antineutrino y nunca se aniquilaban entre sí. Los físicos empezaron a sospechar, que acaso el neutrino y el antineutrino no se aniquilaban entre sí, porque no podían aniquilarse. Acaso había dos clases de neutrinos y dos de antineutrinos, una pareja asociada con los electrones y la otra con los muones: y quizá el neutrino de una pareja no podría aniquilar al antineutrino de la otra.

¿Podría ser, pues, que un muón negativo se descomponga formando: 1.° un electrón; 2.° un antineutrino electrónico y 3-° un neutrino muónico? Y, ¿podría descomponerse un muón positivo, formando 1.° un positrón, 2.° un neutrino electrónico y 3.° un antineutrino muónico?

Si así fuese, eso explicaría los hechos de la desintegración muónica. Sin embargo, la posibilidad de dos clases de neutrinos parecía demasiado, para aceptarla sin testimonios adicionales.

Por eso, en 1962 se proyectó y realizo en Brookhaven, Long Island, un experimento de «neutrinos diferentes». Se lanzaron protones de alta energía sobre un blanco de berilio, de modo que produjeron un choque de piones positivos y negativos, de alta energía. Esos piones se desintegraron, casi inmediatamente, en muones positivos y negativos. Los positivos, al formarse, iban acompañados por neutrinos muónicos, mientras que los muones negativos se formaban acompañados por antineutrinos muónicos.

Antes de que los muones tuviesen tiempo de desintegrarse, chocaba el chorro con una plancha blindada de unos *45* pies de espesor. Todos los piones y muones quedaban detenidos, pero los neutrinos y antineutrinos seguían adelante. (Los neutrinos pueden atravesar años luz de materia sólida, sin ser detenidos.)

Al otro lado de la plancha blindada, los neutrinos tenían ocasión de reaccionar con partículas. Era muy raro que reaccionasen, pero lo hacían alguna vez. Por ejemplo, un neutrino (carga 0) chocaba con un neutrón (carga 0) y formaban un protón (carga +1).

Pero las reglas del juego no permiten que se forme de la nada una carga eléctrica positiva. Si alguna se forma, tiene que aparecer simultáneamente una partícula con carga opuesta, para que permanezca nula la carga total.

Por eso, cuando un neutrino y un neutrón se combinan, formando un protón, tienen que formar también, o un electrón, o un muón negativo, ya que uno u otro ha de proporcionar la carga —1, precisa para compensar la +1 del protón.

Todos los neutrinos del experimento se formaban acompañados de muones, luego eran neutrinos muónicos. Si éstos fueran de verdad distintos de los neutrinos electrónicos, sólo deberían formarse muones. Si los neutrinos muónicos eran idénticos a los electrónicos, al chocar con neutrones podrían producir electrones, además de muones; no en igual número, porque influiría la diferencia de masa, pero se formarían unos y otros.

Pues bien; en el primer experimento y en todos los siguientes, se formaron muones, sólo muones. Electrones jamás fueron observados.

La conclusión es que hay, efectivamente, dos parejas neutrino-antineutrino; una asociada a electrones y positrones, y otra de muones negativos y positivos.

Y ahora viene el tercer enigma de 1a tierra de Mu de los físicos: ¿Qué diablos de diferencia hay entre el neutrino muónico y el electrónico?

Ambos carecen de masa; también de carga. Ambos tienen de espín 1/2. Tomadlos ambos aislados, y el físico no puede concebir el modo de distinguir uno del otro.

Pero el neutrón sabe distinguirlos: con uno de ellos reaccionará formando un protón y un mesón; y con el otro, formando un protón y un electrón. Pero, ¿cómo distingue el neutrón los dos neutrinos, si nosotros no sabemos diferenciarlos?

Nadie lo sabe.

Pues aquí tenéis «la tierra de Mu» de los físicos. Comparad estos misterios con la tierra de Mu de Churchward, que no da más de sí que el imaginario hundimiento de un continente mítico, y decidme cuál tiene más interés novelesco.

15. Calidad prima

No hace mucho me escribió un joven aficionado a las matemáticas, ofreciéndome una demostración de que hay infinitos números primos, y preguntándome: primero, si la demostración era concluyente; y segundo, si había sido propuesta antes.

Le respondí que 1.°: la demostración era concluyente y elegante; pero que 2.°: Euclides había propuesto la misma, casi al pie de la letra, 300 años antes de Cristo.

Esa es, ¡ay!, la fatalidad de casi todos nosotros, los matemáticos aficionados, casi todas las veces. Todo lo cierto que descubrimos no es nuevo; todo lo nuevo que descubrimos no es cierto. Mas cuando descubrimos algo que es cierto desde determinado punto de partida, sin que nadie nos guíe, yo sostengo que es una hazaña. No revolucionará las matemáticas, pero no deja de ser un triunfo de la inteligencia.

Así se lo dije a aquel joven y ahora me gustaría hablaros a vosotros de su demostración y de otras cosas.

Ante todo, ¿qué es un «primo» o, más correctamente, un «número primo»? Pues un número que no puede expresarse como producto de dos, menores ambos que él. Así, como 15 = 3 X 5, 15 *no es primo.* En cambio, 13 no puede expresarse como producto de dos números menores y, por tanto, *es primo.* Claro que 13 = 13 X 1, pero 13 no es menor que 13, así que ese producto no cuenta; cualquier número, sea o no primo, puede expresarse como producto de él mismo por 1; por ejemplo, 15 = 15 X 1, de modo que esas expresiones no establecen la distinción.

Otro modo de expresarlo es que un número primo no es divisible exactamente más que por él mismo y por 1: no tiene «divisores». Así, 15 es divisible exactamente por 3 y por 5, *aparte* de ser divisible por 15 y por 1; pero 13 *sólo* es divisible por 13 y por 1. Repetimos, pues, que 15 no es primo y 13 sí.

Pues bien; ¿cuáles números son primos? He aquí una pregunta nada fácil, ¡ay!, de contestar. No hay modo general de distinguir un primo, sólo con verlo.

Hay ciertas reglas para saber que ciertos números *no son primos,* mas eso no es igual. Por ejemplo, 287.444.409.786 no es primo; puedo afirmarlo a primera vista. Es más, 287.444.409.785 tampoco es primo, y también lo sé a primera vista. Pero, ¿será primo 287.444.409.787? Lo único que sé es que *puede ser* primo, pero también puede *no serlo.* No hay modo de decirlo a ciencia cierta, como no sea buscándolo en una tabla, suponiendo que tengo una tabla que me da todos los primos hasta el billón. Si no dispongo de esa tabla —que es lo cierto— tengo que sentarme con papel y pluma y ponerme a ensayar divisiones.

¿Hay algún modo sistemático de encontrar todos los primos hasta cierto límite? Sí que lo hay. Escribid todos los números del 1 al 100. Podría hacéroslo yo, pero gastaríamos espacio, y para vosotros será un buen ejercicio hacerlo.

El primer número es 1, pero ese *no es primo,* por definición. La razón es que en la multiplicación, que es el modo que tenemos de distinguir los primos de los no primos, el 1 tiene la propiedad privativa de no alterar el producto. Así, 15 puede escribirse como 5x3, o como 5x3x1,o también como 5 X 3 X 1 X 1 X 1...etc. Con el simple convenio de suprimir el 1 de las listas de primos, evitamos la posibilidad de colas de 1, 1... y eludimos algunas desagradables complicaciones en la teoría de los primos. Ningún otro número se comporta en este aspecto como el 1, y ninguno otro requiere tratamiento especial.

Seguimos con el 2, que es primo, puesto que no tiene más divisiones que él mismo y 1. Eliminemos de nuestra lista todos los números divisibles por 2 (no primos, por tanto), y para hacerlo basta tachar un número sí y otro no, a partir del 2. Es decir, que tachamos el 4, 6, 8,

10, etc., hasta el 100 inclusive. Podéis comprobar que esos números no son primos, pues 4 = 2 X 2; 6 = 2 X 3; 8 = 2 X 4, etc.

Miramos nuestra lista y vemos que el número menor no tachado es el 3. Es primo, pues no tiene más divisiones que él mismo y 1. Partimos, pues, del 3 y tachamos, desde él, cada tercer número: 6, 9, 12, 15, etc., hasta el 99 inclusive. Algunos de estos números, por ejemplo, 6 y 12, fueron ya tachados a partir del 2, pero no importa; los tachamos otra vez. Los números tachados ahora son todos divisibles por 3 y, por tanto, no primos: 6=3x2; 9=3x3; etc.

El número siguiente no tachado es el 5, y tachamos, desde él, cada quinto número. Viene luego el 7 y tachamos desde él cada séptimo número. Luego vienen el 11 y el 13, etc. Al llegar al 47 y proceder a tachar el que hace el número 47 a partir de él (el 49) encontramos que hemos tachado ya todos los números que podíamos, por bajo del 100. El número siguiente no tachado es el 53, pero al querer tachar el que hace el número 53 desde él, o sea el 106, ya se sale de nuestra lista.

Por bajo de 100, nos quedan los siguientes números no tachados, 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43, 47, 53, 59, 61, 67, 71, 73, 79, 83, 89 y 97.

Estos son los veinticinco primeros números primos, los menores que 100. Aprendiéndolos de memoria, podremos decir, de una ojeada, si un número cualquiera menor que 100 es primo o no, según figure o no en la lista. ¿Existe alguna relación sencilla entre esos números, alguna fórmula que dé sólo los primos hasta el 100 y no los otros? Aunque pudiésemos elaborar esa fórmula, de poco nos serviría, pues fallaría por encima de 100. Pero después de todo, podemos continuar con el mismo sistema, de partir del primer número no tachado, y tachar todos los que están *ese número* detrás de él. Encontraremos que por encima de 100 hay primos, a saber, 101, 103, 107, 113, 127, etc.

Si hubiésemos escrito todos los números hasta 1.000.000.000.000, habríamos obtenido todos los primos hasta el billón y sabríamos automáticamente, sin duda alguna (si no nos habíamos equivocado al contar), si el número propuesto antes, 287.444.409.787, es primo o no.

Este infalible método de hallar todos los primos, por bajo de cualquier número, por grande que sea, se llama la «criba de Eratóstenes», porque el sabio griego de ese nombre fue quien lo inventó, hacia el año 230 AC[0].

Tiene un inconveniente la «criba de Eratóstenes», y es que lleva un tiempo incalculable. Hasta 100 va bien; pero hacedlo hasta 1.000 o hasta 10.000, y convendréis en que pronto se alarga de un modo prohibitivo.

Pero esperad. Sigamos reuniendo números primos; cada uno nos criba algunos de los números posteriores a él (mayores). Eso implica que cada vez tacharemos un porcentaje mayor de esos números más altos, ¿verdad?

Sí, por cierto. Como hemos visto, hay 25 primos menores que 100; pero entre 100 y 200 sólo hay 21; y entre 200 y 300, 16. Esa disminución es irregular y a veces da saltos, pero, en conjunto, la proporción de primos disminuye. Entre 1.300 y 1.400 sólo hay 11.

Pero, ¿llegan a desaparecer del todo?

Planteémoslo de otra manera. Conforme avanzamos en la serie de los números, hay, por término medio, entre los primos, intervalos cada vez mayores. Es decir, que hay «rachas» cada vez más largas, de números sucesivos no primos. La más larga por bajo de 30, tiene cinco no primos: 24, 25, 26, 27 y 28; por bajo de 97, hay siete números seguidos no primos: del 90 al 96 inclusive; antes del 128, 11: del 114 al 126 inclusive, etc.

---

[0] Frederik Pohl, el tan conocido autor y editor de fábulas científicas, descubrió de joven, por sí mismo, la criba de Eratóstenes y se disgustó mucho al saber que se le habían anticipado. Pero eso bastaría para probar la brillante inteligencia de Fred. Jamás hubiese sido yo capaz de ese invento, aunque parece tan fácil después de explicado.

Si avanzamos lo bastante, encontraremos cien números sucesivos no primos, o mil, o diez mil, etc.

Teóricamente, si nos adentramos lo bastante en la sucesión de los números, llegaremos a encontrar un número cualquiera, por grande que lo queramos, de no primos seguidos. *Pero (y* es mucho *pero* éste), ¿llegará un punto en que el número de no primos seguidos sea infinito? Entonces, a partir de «cierto número», todos los posteriores serían no primos. Ese número crítico sería el mayor número primo existente.

Nos preguntamos, pues, ahora, si el número de primos es infinito, o si hay, por el contrario, algún primo que sea el mayor de todos, sin primo ninguno detrás de él.

Vuestra primera idea podría ser prolongar la criba de Eratóstenes, hasta alcanzar un número, tras el cual se vea que ya no queda ninguno sin tachar. Pero eso es imposible; por mucho que avancéis y muy largas series de no primos que vayáis encontrando, nunca podréis asegurar si hay o no primos posteriores, aunque sea al cabo de un trillón de números.

¡No! Hay que recurrir a deducciones lógicas. Sea un número no primo, producto de primos, por ejemplo, 57 = 19 X 3. Añadámosle 1 y obtendremos 58. El número 58 *no es* divisible por 3, pues si intentamos dividirlo, nos resulta 19 y de resto 1; ni tampoco es divisible por 19, pues obtendríamos 3 y de resto 1. Eso no quiere decir que 58 no sea divisible por ningún número, pues lo es por 2 y por 29. (58 = 2 X 29.)

Pero se ve que si le añadimos 1 a un número que sea producto de otros menores, *ya no será* divisible por ninguno de ellos. Expresándolo en símbolos:

Si N = P X Q X R..., N + 1 *no es* divisible ni por P, ni por Q, ni por R, ni por ningún otro divisor de N.

Pues bien; a partir del 2, formemos el producto de todos los primos sucesivos, hasta uno de ellos. Empecemos por los dos primos más pequeños: 2 X 3=6.

Añadiendo 1 al producto, resulta 7, que no es divisible por 2, ni por 3; sabemos que 7 es primo. Formemos ahora (2x3x5) + 1 = 31, que también es primo.

Ahora (2 X 3 X 5 X 7) + 1 = 211 y (2 X 3 X 5 X 7 X 11) + 1 = 2.311, primos ambos, también. Si ahora ensayamos (2 X 3 X 5 X 7 X 11 X 13)

+ 1 = 30.031, éste *no es un número primo;* pero ni 2, ni 3, ni 5, ni 7, ni 11, ni 13 (que son *todos* los primos hasta 13) figuran, entre sus divisores; luego los primos que hay que multiplicar para obtener 30.031 tienen que ser mayores que 13; y ciertamente 30.031 = 59 X 509.

Podemos decir, de un modo general, que 1 más el producto de cualquier número de primos sucesivos, empezando por 2 y terminando en P, o es primo él mismo, y ciertamente mayor que P, o es un producto de números primos, mayores todos que P. Y como eso es cierto, cualquiera que sea P, no puede existir un primo máximo, puesto que hay un método para hallar otro mayor, por grande que sea P. Y eso, a su vez, implica que el número de primos es infinito.

Esa es, en esencia, la demostración dada por Euclides, y la demostración hallada independientemente por e1 joven que me escribió.

El siguiente problema es: Demostrado que hay infinitos primos, ¿hay alguna fórmula que cumplan todos los primos y ningún no primo, de modo que podamos decir: tal número es primo, porque satisface a la fórmula; y tal otro, en cambio, no? Pues hemos visto que para averiguar si 287.444.409.787 es primo, hay que construirse la infalible criba de Eratóstenes, pero pasando por todos los primos menores, sin atajo posible. Una «fórmula de primos» nos permitiría operar directamente con el 287.444.409.787 y nos diría si es primo o no.

Pero, ¡ay!, no se conoce tal fórmula, ni es probable que llegue a encontrarse *, aunque tampoco veo seguro yo que esté demostrado que es imposible hallarla. El orden de los primos en la sucesión es por completo irregular, y ningún matemático ha sido capaz de establecer una ordenación, aunque sea compleja, que posibilite una «fórmula de primos», ni siquiera complicada.

Moderemos, pues, nuestras aspiraciones. ¿Será posible establecer fórmulas útiles, que nos den, *no todos los primos,* pero al menos *siempre primos?* Con ellas podríamos obtener automáticamente series de primos seguros, aun sabiendo que nos saltamos multitud de otros.

Pero tampoco esas existen, salvo algunos casos especiales, poco prácticos. Se busquen como se busquen métodos prácticos que nos den sólo primos, siempre se deslizan no primos. Por ejemplo, podría creerse que sumándole 1 a productos de primos sucesivos, empezando por 2, resultarán sólo primos. Los números que antes obtuvimos así fueron 7,31, 211 y 2.311, ¡todos primos! Pero el siguiente de la serie era 30.031, que *ya no era primo.*

Se han establecido fórmulas en que la variable n se sustituía por los números 1, 2, 3, etc., y resultaban números primos para todos los valores de n hasta n =40; pero para n = 41 «se nos cuela» un no primo.

Moderemos, pues, aún más nuestras aspiraciones. ¿Hay algún método para obtener sólo números no primos?

Estos podrán ser menos interesantes, pero eliminándolos podríamos al menos estudiar un grupo de números remanentes, que sería más denso en primos.

¡Esto sí! Al fin podemos responder afirmativamente a algo. Al construir la criba de Eratóstenes, por ejemplo, notaríais, acaso, que al tachar cada segundo número desde el 2, sólo tachábamos números terminados en 2, 4, 6, 8 y 0 y que éstos los tachábamos todos. Eso significa que todo número, por grande y formidable que sea, aunque tenga un trillón de cifras, *no será primo* si su última cifra es 2,4,6,8,ó 0,o en otras palabras, si es una cifra par.

Como la mitad justa de cualquier serie de números sucesivos terminan en esas cifras, resulta que todos los primos, menos naturalmente el propio 2, tienen que figurar en la otra mitad, entre los terminados en cifras impares.

Y cuando, desde el 5, tachábamos cada quinto número, resultaban eliminados sólo los terminados en 0 y en 5, pero todos ellos. Los terminados en 0 estaban ya despachados; ahora hay que eliminar de la lista de posibles primos todos los terminados en 5, menos naturalmente el 5 mismo.

Eso significa que, fuera del 2 y del 5, sólo habremos de buscar primos entre los terminados en 1, 3, 7 ó 9. Esto nos permite eliminar de una lista de números sucesivos, el 60 por 100 de ellos; y buscar los primos entre el 40 por 100 restante.

Claro que si no pensamos en una lista finita de números sucesivos, por ejemplo del 1 a un billón, sino de *todos los números,* ese 40 por 100 en que puede haber primos sigue siendo infinito y contiene un número infinito de ellos, y también infinitos no primos. El restringir el campo en que hay que buscar los primos no nos resuelve el problema final de encontrarlos todos, por operaciones mecánicas más fáciles que la criba de Eratóstenes; pero por lo menos nos desbroza algo el terreno.

Cierto que son posibles otras eliminaciones. No es primo, sino divisible por 3, todo número, por largo y complicado que sea, cuyas cifras sumen un múltiplo de 3. Pero sumar las cifras es fastidioso, así que limitémonos a mirar sólo la última. Eso de fijarnos sólo en la última es el único medio bastante sencillo para resultar agradable. ¿Podremos sacar más partido de esa cifra?

---

* ¡Sí que la hay!; la llamada «congruencia de Wilson». Pero hace bien el autor en olvidarla, pues su aplicación presenta dificultades prácticas sobrehumanas.—*(N. del T.)*

Para intentarlo, preguntémonos qué magia tienen el 2 y el 5, que les permite marcar su sello en la cifra final. Nuestro sistema de numeración tiene 10 por base, y10=2 X 5. Lo que tenemos que hacer es encontrar un número menor que 10, que sea producto de dos diferentes primos. Acaso así podremos concentrar la magia en un campo más pequeño.

El único producto menor que 10 es 6=2x3.

Todo número, o es múltiplo de 6, o al dividirlo por 6 da el resto 1, 2, 3, 4 ó 5. No caben otras posibilidades.

Es decir, que todo número admite una de las formas 6n, 6n+l, 6n+2, 6n+3, 6n+4 ó 6n+5. Entre ellas, los de forma 6n no pueden ser primos, porque son divisibles por 2 y por 3 (6n = 2 X 3n = 3 X 2n*).* Todo número de la forma 6n + 3 es divisible por 3.

Eso quiere decir que todos los primos, menos 2 y 3 han de ser de las formas 6n+1 ó 6n+5; y como 6n+5 es equivalente a 6n—1, resulta que a todos los números primos les sobra o les falta 1, para ser múltiplos de 6.

Hagamos, pues, una lista de múltiplos de 6: 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60, 66, 72, 78, 84, 90, 96, 102, ...

Quitándoles y añadiéndoles 1, obtenemos una doble fila, con los primos en negrita:

5, 11, 17, 23, 29, 35, **41, 47, 53, 59**, 65, **71,** 77, **83, 89**, 95, **101** ...

7, 13, 19, 25, **31, 37, 43**, 49, 55, **61, 67, 73, 79,** 85, 91, **97, 103** ...

Como veis, en esa doble fila viene apareado cada múltiplo de 6 menos 1, con ese múltiplo más 1. Mirando esa lista parece que al menos un número de cada pareja tiene que ser primo, lo cual introduciría en los primos un orden adicional. Pero no es así, por desgracia, aunque así resulte en lo escrito. Si seguimos adelante, encontraremos la pareja 119-121, que no son primos ninguno de los dos; pues 119 = 6 X 20—1 = 7 X 17.

Y 121 = 6 X 20 + 1 = 11 X 11. Cuanto más adelante sigamos, más frecuentes serán las parejas de números no primos.

A veces sólo es primo el número menor (de arriba) de la pareja, como en la **23**, 25. A veces sólo el mayor (de abajo) como en la 35, **37**. Al cabo tantos primos viene a tener una línea como la otra, pero en un orden absolutamente irregular.

En otras ocasiones son primos los dos números de la pareja, como en la **5, 7**, la **11, 13** y la **101, 103.** Esas parejas se llaman «primos gemelos» y se las encuentra, por mucho que se avance, en la sucesión de los números. La frecuencia de esas parejas disminuye conforme avanzamos, como la frecuencia de los mismos primos; pero *parece* que la frecuencia de los gemelos nunca se anula; que el número de «primos gemelos» es infinito. Empero, *eso no está demostrado.*

Los números de la forma 6n+1 y 6n—1 comprenden todos los primos que existen, menos el 2 y el 3; y, sin embargo, no hacen más que un tercio de cualquier lista finita de números sucesivos. ¿Podrá aprovecharse esto en el método de la cifra final?

La respuesta es ¡¡sí!!, y pongo doble admiración por que ahora llego a algo que estoy seguro de que viene siendo conocido por los matemáticos, desde hace dos siglos lo menos; pero que yo nunca lo he visto mencionado en ninguno de mis libros. Lo he inventado yo independientemente.

Lo único que hay que hacer es usar el sistema de numeración de base 6, en el cual nuestros números corrientes se transforman en:

Base 10: 1, 2, 3, 4, .5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14,15, 16, 17.

Base 6: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 20, 21,22, 23, 24, 25.

(No hay tiempo de entrar en detalles sobre los otros sistemas de numeración, pero véase «One, ten, buckle my shoe». Reeditado en *Adding a Dimensión,* Doubleday, 1964.)

En el sistema de base 6 sólo pueden ser primos los números terminados en 1 y 5. En este sistema conoceríamos en seguida que 14313234442, 14313234443, 14313234444 y 14313234440 *no son primos,* con sólo ver la última cifra. En cambio, 14313234441 y 14313234445 podrían ser primos, pero, por desgracia, también podrían no serlo.

El hecho es que, en el sistema de base 6, podríamos eliminar inmediatamente dos tercios de los números de una lista finita de sucesivos, con sólo mirar la última cifra, dejando un tercio de posibles primos (excepto 2 y 3). Eso es más de lo que se logra en el sistema de base 10, en que eliminábamos tres quintos, dejando dos quintos.

Pero, ¿y si usamos como base un número que no tenga dos factores primos, como el 6 y el 10, sino tres?

El menor de los que cumplen eso es 30 ?= 2 X 3 X 5. Si usamos 30 como base, consideremos que todos los números son de la forma 30n, 30n+1, 30n +2, 30n +3..., hasta 30n+29. De ellos los de la forma 30n, 30n+2, 30n+4, etc., son divisibles por 2 y, por tanto, no primos. Los de la forma 30n+3, 30n+9, 30n+15, etcétera, son divisibles por 3 y, por tanto, no primos.

Y los de forma 30n+5 y 30n+25 son divisibles por 5 y, por tanto, no primos. Al cabo, los únicos números no divisibles por 2, 3 ni 5 (excepto los propios 2, 3 y 5) y que, por tanto, *pueden* ser primos, son los de las formas 30n+l, 30n+7, 30n+11, 30n+13, 30n+17, 30n+19, 30n+23 y 30n+29.

Parecen muchas las formas que pueden dar primos; pero en el sistema de base 30 hay 30 cifras distintas, representadas por los números del 0 al 29 inclusive. Y en ese sistema, los números terminados en 22 de esas cifras no son primos. Sólo pueden serlo los terminados en las 8 cifras que, en nuestro sistema decimal, se escriben 1, 7, 11, 13, 17, 19, 23 y 29.

En el sistema de base 30 eliminamos, pues, 11/15, o sea, el 73 1/3 por 100 de cualquier lista de números sucesivos; y concretamente todos los primos, menos 2, 3 y 5, en el 26 2/3 por 100 restante.

Claro que podríamos seguir adelante, usando el sistema de numeración de base 210, ya que 210 = 2 X 3 X 5 X 7; o bien el de base 2310=2 X 3 X 5 X 7 X 11; o bien otros aún mayores, que tengan cuantos factores primos gustemos. Exceptuando siempre todos esos factores primos de la base, encontraremos los primos restantes concentrados en fracciones cada vez más pequeñas de cualquier lista de números sucesivos.

He aquí las concentraciones, hasta donde he llegado yo:

Base	% eliminado	% restante
2	50	50
2x3 =6	662/3	331/3
2x3x5 =30	731/3	262/3
2x3x5x7 = 210	77 1/7	22 6/7

Renuncio a seguir. Pueden ustedes hacerlo con 2310 o con un sistema de base aún mayor[0].

Pero ¡cuidado! Cuanto mayor se tome la base del sistema de numeración, más incómodo de manejar será dicho sistema en la práctica, por muy bonito que parezca en teoría.

---

[0] Publicado este capítulo, unos lectores se han granjeado mi gratitud, enviándome fórmulas para abreviar tales cálculos. De haberlas conocido, me habría ahorrado mucha fatiga.

Es bien fácil comprender el modo de manejar los números en el sistema de base 30; pero ponerse de veras a realizar las operaciones en el papel es tomar billete de ida al asilo, al menos con una cabeza tan poco ágil como la mía.

La ventaja de concentración de primos, al pasar al sistema de base 30 (no hablemos siquiera de la base 210 o mayores), no compensa sencillamente el enorme aumento en el trabajo [*].

Atengámonos, pues, al sistema de base 6, que no sólo concentra más eficazmente los primos que nuestro sistema ordinario de base 10, sino que es hasta más fácil, en cuanto uno se acostumbra a él.

O dicho de otro modo: El sistema de base 6 es, en este aspecto, el de «prima calidad»; y que no se alborote la galería.

---

[*] Parece broma este trabajoso paso a la base 6, pues no hace falta *toda la expresión* del número en ese sistema; basta *la última cifra,* que es sencillamente el resto de la primera división Por 6. Las siguientes divisiones sobran. Pero ya la primera cuesta mucho más trabajo que sumar las cifras del número impar (omitiendo naturalmente los sumandos 3, 6 y 9). Descartando, ante todo, todos los impares que terminan en 5, es inútil pensar en la base 30—(N. *del T.)*

16. El Quinto de Euclides

Algunos de mis artículos suscitan más comentarios de los lectores que otros; y entre los más destacados en ese sentido figura uno, en que yo enumeraba a los científicos que considero de primera magnitud, terminando con una relación nominal de los diez sabios más insignes de todos los tiempos.

Naturalmente, recibí cartas, abogando por la supresión de uno o más de mis predilectos, en favor de otro u otros. Aun hoy, siete años y medio después de publicado el artículo, siguen llegándome cartas.

Suelo contestar, explicando que, salvo el caso de Isaac Newton, respecto al cual no caben discrepancias, eso de elegir los diez sabios más ilustres es asunto sumamente subjetivo y no puede dirimirse discutiendo.

Recientemente recibí una carta de un lector, quien argüía que Arquímedes, uno de mis diez, debía ser reemplazado por Euclides, que no figuraba entre ellos. Yo contesté en mi habitual estilo conciliador; pero terminaba por decir que Euclides es un «simple sistematizador», mientras que Arquímedes había logrado progresos capitales en física y matemáticas.

Pero después me remordió la conciencia. Mantuve mi criterio de poner a Arquímedes sobre Euclides, pero la frase «simple sistematizador» me molestaba. No es siempre *simple* ser un sistematizador [0].

Durante tres siglos antes de Euclides, que vivió hacia el año 300 AC, los geómetras griegos habían trabajado en demostrar algún que otro teorema geométrico, hasta llegar a descubrir muchísimos.

Lo que hizo Euclides fue construir con todo ello un sistema. Empezó por ciertas definiciones y suposiciones y luego las aplicó a demostrar unos cuantos teoremas.

En base a aquellas definiciones y suposiciones, más los pocos teoremas que tenía ya demostrados, demostraba otros cuantos, y así sucesivamente.

Fue el primero, que nosotros sepamos, que edificó un sistema matemático perfecto, basado en el criterio explícito de que es inútil intentar *probarlo todo;* que es esencial partir de ciertas cosas que no pueden probarse, pero que pueden admitirse sin pruebas, porque satisfacen a la intuición. Tales suposiciones intuitivas, sin pruebas, se llaman «axiomas».

Sólo eso era ya una gran conquista intelectual, pero Euclides hizo algo más. Eligió buenos axiomas.

Para apreciar la dificultad de eso, consideremos que exigimos que la lista de axiomas sea completa, es decir, que basten para demostrar todos los teoremas útiles del campo particular del conocimiento que estemos explorando. Más, al mismo tiempo, no deben ser redundantes; debe ser imposible demostrar todos esos teoremas en cuanto se omita uno solo de los axiomas, o demostrar uno o más de los axiomas apoyándose en los restantes. Por último, los axiomas han de ser consistentes, es decir, que no pueda deducirse de algunos de ellos que una cosa es cierta, y de otros que es falsa.

Durante dos mil años, el sistema de axiomas de Euclides pasó por intangible. Nadie juzgó nunca necesario añadir otro axioma, ni nadie fue capaz de eliminar ninguno, o de modificarlo sustancialmente, ¡magnífico testimonio del acierto de Euclides!

Pero a fines del siglo XIX, cuando se afinó el concepto del rigor matemático, se descubrió que en el sistema de Euclides había muchas suposiciones tácitas, es decir, hechas por Euclides sin decir explícitamente que las hacía; y que parecían hacer también sus lectores, sin confesárselo a sí mismos.

---

[0] Algunas veces sí. Fuera de mis obras de ficción científica, yo soy un simple sistematizador. Para que no digáis que *nunca* soy modesto.

Por ejemplo, entre sus primeros teoremas hay varios que demuestran que dos triángulos son congruentes (iguales en forma y tamaño) por una línea de razonamiento que consiste en imaginar que uno de ellos se mueve en el espacio, hasta superponerse al otro. Mas eso presupone que una figura geométrica no cambia de tamaño ni forma al moverse. «Claro que no cambia», diréis; pero Euclides no dijo que lo suponía.

También supuso Euclides que una línea recta puede prolongarse indefinidamente en ambos sentidos, pero tampoco dijo que estuviese haciendo esa suposición.

Además nunca tuvo en cuenta propiedades básicas tan importantes como *el orden* de los puntos en una línea; y algunas de sus definiciones fundamentales eran inadecuadas.

Pero no importa. En el último siglo, la geometría de Euclides ha sido asentada sobre la base del más estricto rigor; y aunque eso exigió modificar el sistema de axiomas y definiciones, la geometría de Euclides siguió la misma. Eso quiere decir que los axiomas y definiciones de Euclides, completados por sus suposiciones tácitas, cumplen perfectamente sus fines.

Estudiemos ahora los axiomas de Euclides. Eran diez y los dividió en dos grupos de cinco. Los del primer grupo los llamó «nociones comunes», porque son comunes a todas las ciencias, a saber:

1.° Cosas iguales a la misma cosa son también iguales entre sí.

2.° Si a iguales se añaden iguales, las sumas son iguales.

3.° Si de iguales quitamos iguales, los residuos son iguales.

4.° Dos objetos que coinciden el uno con el otro son iguales entre sí.

5.° El todo es mayor que la parte.

Estas «nociones comunes» parecen tan comunes, tan obvias ciertamente, tan de inmediata aceptación intuitiva, tan imposibles de rebatir, que parecen representar la verdad absoluta. Parecen algo que cualquier persona podría aprehender, tan pronto como ha desarrollado la luz de la razón. Sin percibir nunca el universo en forma ninguna, sino viviendo sólo en la luminosa oscuridad de su propia mente, vería que cosas iguales a la misma cosa son iguales entre sí, y todo lo restante.

Cabría entonces, aplicando los axiomas de Euclides, deducir todos los teoremas de la geometría y, por tanto, las propiedades básicas del universo, a primeros principios, sin haber observado nada.

Los griegos estaban tan fascinados con esa idea de que todo el conocimiento matemático procede de dentro, que perdieron un estímulo importante, que podría haberles conducido al desarrollo de la ciencia experimental. Entre ellos hubo experimentadores, especialmente Ctesibius y Herón, pero su obra era considerada por los griegos cultos como una especie de artesanía más que de ciencia.

En uno de los diálogos de Platón, Sócrates le hace a un esclavo ciertas preguntas acerca de un diagrama geométrico y le hace contestarlas y demostrar, de paso, un teorema. Ese era el método de Sócrates para demostrar que, aun un hombre del todo ineducado, podía extraer verdades de fuera de sí mismo. Sin embargo, era necesario un hombre hasta refinado, como Sócrates, para formular las preguntas; y el esclavo no era tampoco del todo inculto, pues sólo por haber vivido percibiendo, durante años, había aprendido a suponer muchas cosas, por observaciones y ejemplos, sin darse cuenta de ello del todo; ni él, ni al parecer Sócrates.

Todavía en 1800, filósofos prestigiosos, tales como Immanuel Kant, sostenían que los axiomas de Euclides representan la verdad absoluta.

Pero ¿de veras la representan? ¿Discutiría alguien la afirmación de que el todo es mayor que la parte? Puesto que 10 puede descomponerse en 6 + 4, no admitimos, con plena razón, que 10 es mayor que 6 y que 4?

Si un astronauta cabe en una cápsula espacial, ¿no hay plena razón para admitir que el volumen de la cápsula es mayor que el del astronauta? ¿Cómo podremos dudar de la universal verdad del axioma?

Veamos. Toda sucesión de números consecutivos puede dividirse en pares e impares, así que podríamos deducir que el número total de elementos de toda sucesión de números consecutivos tiene que ser mayor que el de los pares o el de los nones. Y, sin embargo, si consideramos una sucesión *infinita* de números consecutivos, resulta que el número total de elementos es igual al de los pares. En la llamada «matemática transfinita» el axioma de que el todo es mayor que la parte *no rige,* sencillamente.

O también supongamos dos automóviles que viajan entre los puntos A y B por idéntica ruta. Ambas trayectorias coinciden. ¿Son iguales? No necesariamente. El primer automóvil viajó de A a B; y el segundo de B a A. En otras palabras, dos líneas pueden coincidir y ser, sin embargo, desiguales, ya que el sentido de una puede ser opuesto al de la otra.

¿Es esto simple fantasía? ¿Puede decirse que un segmento tiene sentido? Sí, por cierto. Un segmento es «un vector», y en la matemática vectorial las reglas no son exactamente las mismas que en la matemática corriente y las figuras pueden coincidir sin ser iguales.

En suma, los axiomas no son ejemplo de absoluta verdad y es muy probable que no exista realmente la llamada verdad absoluta. Los axiomas de Euclides no son axiomas porque aparezcan como verdad absoluta, brotada de cierta luz interior, sino sólo porque parecen ser ciertos en el contexto del mundo real.

Y por eso es por lo que los teoremas deducidos de los axiomas de Euclides parecen corresponder a lo que llamamos realidad. *Partieron* de lo que llamamos realidad.

Es posible partir de cualquier serie de axiomas, con tal que no haya contradicción entre ellos, y deducir un sistema de teoremas, consistentes con esos axiomas y entre sí, aunque no sean consistentes con lo que consideramos mundo real. Esto no hace las «matemáticas arbitrarias» menos «verdaderas» que las deducidas de los axiomas de Euclides, sino sólo acaso menos útiles. Pero una «matemática arbitraria» puede ser *más útil* que las matemáticas corrientes de «sentido común», en campos especiales, tales como los transfinitos, los de vectores, etcétera.

Aun así no hay que confundir «útil» con «verdadero». Aunque un sistema de axiomas sea tan extravagante que no resulte útil en ningún sentido práctico concebible, no obstante nada podemos decir acerca de «su verdad». Si es «autoconsistente», eso es todo lo que tenemos derecho a pedirle a un sistema de pensamiento. «Verdad» y «realidad» son términos teológicos, no científicos.

Pero volvamos a los axiomas de Euclides. Hasta ahora hemos expuesto sólo las cinco «nociones comunes».

Figuraban en la lista otros cinco axiomas, específicamente aplicables a la geometría; y éstos se llamaron más tarde «postulados». El postulado primero era:

1° Es posible trazar una recta desde cualquier punto, a otro punto cualquiera.

Esto parece sumamente aceptable, pero, ¿está usted seguro? ¿Sabe usted demostrar que puede trazarse una recta de la Tierra al Sol? Si pudiésemos estar tranquilamente en el Sol v mantener la Tierra quieta en su órbita y lanzar como fuese una cuerda de la Tierra al Sol, y ponerla completamente tirante, esa cuerda representaría una línea recta de la Tierra al Sol. Usted está seguro de que este es un razonable «experimento mental» y yo también; pero sólo *suponemos* que la cosa puede ser así.

Jamás podremos hacer la prueba, ni demostrarlo matemáticamente.

Y a propósito, ¿qué es una línea recta? Acaso de hacer la suposición de que, poniendo una cuerda bien tirante, toma una forma que reconoceríamos como lo que llamamos línea recta. Pero, ¿qué forma es esa? Lo único que podemos decir es sencillamente que una recta es

algo muy tenue y muy muy derecho; o parafraseando a Gertrude Stein: «Una línea recta es una línea recta es una línea recta.»

Euclides define la recta como «una línea situada uniformemente respecto a los puntos sobre sí misma»; pero no querría yo tener que explicarle lo que significa esa frase a un principiante en el estudio de la geometría.

Otra definición dice que «una recta es la menor distancia entre dos puntos»; pero si ponemos una cuerda completamente tirante, no puede ir de uno de sus extremos al otro por más corto camino; así que decir «la distancia más corta entre dos puntos» es lo mismo que decir «la forma de una cuerda, completamente tirante»; y podemos seguir preguntando: y ¿qué forma es esa?

En la moderna geometría, la línea recta jamás se define. Lo que en esencia se dice es: Llamamos recta a algo que tiene las siguientes propiedades, en relación con otros términos indefinidos, como «punto», «plano», «entre», «continuo», etc.; y luego se relacionan las propiedades.

Sea como quiera, he aquí los restantes postulados de Euclides:

2° Una línea recta finita puede prolongarse continuamente en línea recta.

3° Se puede trazar una circunferencia, con un punto cualquiera como centro y cualquier distancia como radio.

4° Todos los ángulos rectos son iguales.

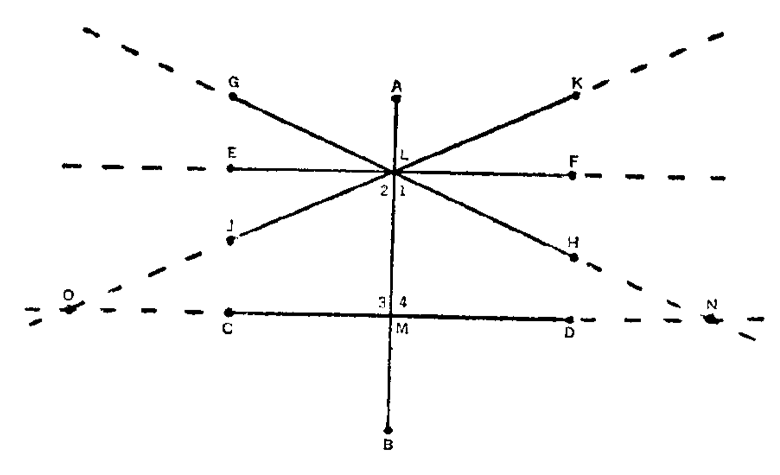
5° Si una recta corta a otras dos, formando ángulos internos, por el mismo lado, que suman menos de dos ángulos rectos, esas dos rectas, prolongadas indefinidamente, se cortarán por ese lado en que los ángulos suman menos de dos rectos.

Supongo que habréis notado en seguida una cosa:

De los diez axiomas de Euclides, sólo uno, el postulado quinto, es un trabalenguas bien largo; y sólo este postulado quinto carece de sentido inmediato.

Coged a cualquier persona inteligente, que haya estudiado aritmética y haya oído de rectas y circunferencias y leedle uno a uno los diez axiomas, dejándole pensar un momento; y a cada uno de los nueve primeros responderá: «Es claro.» Pero al oír el postulado quinto, dirá seguramente: «¿Cómo?»

Y tardará bastante rato en comprender de qué se trata. Como que yo mismo no me comprometería a explicárselo, sin una figura como la siguiente:



Consideremos dos de las líneas llenas: la que va desde el punto C al D, por el M (llamémosla recta CD por sus puntos extremos); y la que pasa por los puntos G, L y H (recta GH). Una tercera recta, que pasa por los puntos A, L, M y B (recta AB) corta a la GH y a la CD, formando ángulos con ambas.

Si suponemos perfectamente horizontal la CD y perfectamente vertical la AB, los cuatro ángulos en que se cortan las dos (los ángulos CMB, BMD, DML y LMC) son rectos, e iguales entre sí, por el postulado 4°. En particular los ángulos DML y LMC, numerados 3 y 4 en el dibujo, son iguales y rectos los dos.

Consideremos ahora la recta GH. No *es* perfectamente horizontal. Eso significa que los ángulos que forma en su intersección con la recta AB (no he definido la «intersección») no son rectos, ni iguales todos. Puede demostrarse que los ALH y GLB son iguales, y que también lo son los HLB y GLA; pero que cualquiera del primer par es distinto que cualquiera del segundo. En particular, el ángulo GLB, marcado 2, no es igual al HLB, marcado 1.

(No me he preocupado de definir «perfectamente horizontal», ni «perfectamente vertical», ni «cortar», ni de explicar por qué al cortarse una recta perfectamente horizontal, con una perfectamente vertical, forman cuatro ángulos rectos; pero tampoco pretendo ser riguroso del todo. Podría serlo, pero a costa de más palabrería de la que estoy dispuesto a emplear.)

Tracemos por el punto L la recta EF, perfectamente horizontal, como la CD. Se formarán, en su intersección con la recta AB, cuatro ángulos rectos iguales. En particular los ángulos FLB y ELB son rectos. Pero el ángulo HLB está contenido en el ángulo FLB y sobra espacio (¿qué significa «contenido en»?) Puesto que el HLB es sólo parte del FLB y éste es recto, el ángulo HLB (ángulo 1) es menor que un recto, según la 5° «noción común».

Del mismo modo, al comparar el ángulo ELB, que sabemos que es recto, con el GLB (ángulo 2), podemos demostrar que el ángulo 2 es mayor que un recto.

Los «ángulos internos» del dibujo son los del lado de la recta GH en que está la recta CD; y los del lado de la recta CD en que está la recta GH; es decir, los ángulos 1, 2, 5 y 4.

El postulado 5.° habla de los «ángulos internos del mismo lado», es decir, el 1 y 4 en un lado y el 2 y 3 en el otro. Como sabemos que 3 y 4 son rectos, que 1 es menor que un recto y que 2 es mayor que un recto, podemos decir que los ángulos internos de un lado, 1 y 4, dan una suma menor que dos rectos; mientras que los interiores del otro lado dan una suma mayor que dos rectos.

Ahora bien; el quinto postulado afirma que si se prolongan las rectas GH y CD, se cortarán por el lado en que están los ángulos internos, que suman menos de dos rectos. Y efectivamente, en el dibujo se ve que si se prolongan en ambos sentidos las rectas GH y CD (líneas de trazos), se cortan en el punto N, por el lado de los ángulos internos 1 y 4. Por el otro lado se separan más cada vez, y es claro que nunca se cortarán.

En cambio, si se traza por L la recta JK, se invierte la situación. El ángulo 2 será menor que un recto y el 1 mayor (ahora llamamos 3 al JLB y 1 al KLB). Entonces los ángulos internos 2 y 3 darán una suma menor que dos rectos y los 1 y 4 la darán mayor que dos rectos. Si prolongamos las rectas JK y CD (líneas de trazos) se encontrarán en el punto O, del lado de los ángulos 2 y 3. Por el otro lado divergirán más y más.

Ahora que hemos explicado por extenso el postulado quinto (aunque todavía con bastante falta de rigor) ya estaréis dispuestos a decir: «Sí, claro, ciertamente, es obvio.» Puede ser, pero algo tan obvio no debería requerir cientos de palabras de explicación. Los otros nueve axiomas no hubo que analizarlos, ¿verdad?

Pero además, hemos *explicado* el postulado quinto; pero, ¿lo hemos demostrado? No. Yo, tras interpretar lo que el enunciado significa, me referí al dibujo diciendo: «y ciertamente en la figura se ve».

Pero ésa es sólo una figura, que tiene una recta perfectamente vertical, que corta a dos, una de las cuales es perfectamente horizontal. ¿Y si no hay líneas horizontales ni verticales y ninguno de los ángulos internos es recto? El postulado se refiere a *toda recta* que corta a otras dos, y yo ciertamente no he examinado eso.

Podríamos trazar un millón de figuras de diferentes tipos y mostrar que en cada caso específico rige el postulado; pero eso no basta. Habría que demostrar que rige en todos los casos concebibles, lo cual no puede hacerse con figuras. Una figura sólo puede poner clara la demostración; pero la demostración en sí hay que deducirla por legítima lógica, de premisas más elementales, demostradas ya o supuestas. Y eso no lo hemos hecho.

Consideremos ahora el postulado quinto desde el punto de vista del movimiento de las rectas. Hagamos girar la GH alrededor de L, como pivote, de modo que se acerque más y más a coincidir con la recta EF. (¿Seguirá siendo recta la línea, mientras gira de ese modo? Lo más que podemos hacer es *admitir* que sí.) Al girar la recta GH hacia la EF, su punto N de intersección con la recta CD se aleja más y más hacia la derecha.

Si partimos de la recta JK y la giramos hasta que termine por coincidir con la EF, el punto de intersección O se alejará más y más hacia la izquierda. Usad la figura, trazando en ella algunas rectas más, si es preciso, y lo veréis claro.

Pero consideremos la propia recta EF. Cuando GH ha girado hasta coincidir por fin con la EF, podemos decir que el punto N de intersección se ha alejado a una distancia infinita hacia la derecha (entendamos lo que entendamos por «distancia infinita»); y cuando la recta JK coincida con la EF, el punto O de intersección se habrá alejado a una distancia infinita hacia la izquierda.

Podemos, por tanto, decir que las rectas EF y CD se cortan *en dos* puntos, uno a infinita distancia a la derecha y otro a infinita distancia a la izquierda.

O, visto de otro modo, la recta EF, perfectamente horizontal, corta a la AB según cuatro ángulos rectos. En ese caso los ángulos 1, 2, 3 y 4 son todos rectos y todos iguales. El 1 y el 4 suman dos rectos, y lo mismo el 2 y el 3.

Pero según el postulado quinto, la intersección cae del lado en que los ángulos internos suman *menos de dos rectos.* Como en el caso de las rectas EF y CD, cortadas por la AB, ningún par de ángulos internos suma menos de dos rectos, la intersección no puede estar en ningún lado.

Por dos series de argumentos hemos demostrado, pues, 1.° que las rectas EF y CD se cortan en dos puntos, situados ambos a distancia infinita, y 2.° que las rectas EF y CD no se cortan. ¿Habremos hallado una contradicción y, por tanto, un defecto en la serie de axiomas de Euclides?

Para evitar una contradicción, podemos decir que cortarse a distancia infinita es equivalente a no cortarse en absoluto. Son diferentes modos de decir lo mismo. El convenio de decir que *a* es igual que *b* es consistente, en este caso, con el resto de la geometría. Podemos, pues, arreglarnos con él.

Ahora bien; cuando dos rectas, tales como EF y CD, no se cortan al prolongarlas, a una *distancia finita,* por grande que sea, diremos que son «paralelas».

Claro que sólo hay una recta, pasando por L, que pueda ser paralela a la CD, que es la EF. Otra recta cualquiera que pase por L, por poco distinta de la EF que sea, será del tipo de la GH o de la JK, con un ángulo interno menor que un recto, por uno u otro lado.

Esta demostración es un tanto ligera y poco rigurosa, pero nos permite sacar la consecuencia y decir: Dada una recta y un punto exterior a ella, por ese punto es posible trazarle a la recta una paralela y sólo una.

Ese enunciado es del todo equivalente al quinto postulado de Euclides. Si suprimimos dicho postulado y ponemos en su lugar esa afirmación, el edificio entero de la geometría de Euclides sigue en pie, del todo inconmovible.

La versión del postulado que se refiere a rectas paralelas *suena* a más clara y fácil de comprender que el modo de enunciarlo Euclides, pues aun los alumnos principiantes tienen una imagen de lo que son las paralelas, aunque no tengan ni la menor idea de lo que son los

ángulos internos. Por eso es por lo que los libros elementales de geometría suelen dar el postulado en términos de «paralelas».

Pero veamos. El que nosotros no hayamos demostrado el postulado quinto no significa que no pueda demostrarse. Acaso por cierta línea de razonamientos, sumamente largos, sutiles e ingeniosos, sea posible la demostración, aplicando los cuatro postulados restantes y las cinco nociones comunes, o bien otro axioma adicional, no comprendido en la lista, pero mucho más sencillo y «obvio» que el quinto.

Por desgracia no. Durante 2000 años los matemáticos intentaron una y otra vez deducir el postulado quinto de los axiomas restantes, sólo por verlo tan largo y poco evidente que parecía imposible que fuese un axioma.

Pero siempre fracasaban y parece seguro que *tenían que fracasar.* Sencillamente, ese postulado no va contenido en los otros axiomas, ni en ningún otro sistema de ellos, geométricamente útiles y más sencillos que él.

Puede, ciertamente, afirmarse que el quinto postulado es la más genial idea de Euclides. Con maravillosa perspicacia, se dio cuenta de que con los nueve axiomas breves y claramente obvios, no podía demostrar el postulado quinto; ni tampoco podía pasarse sin él. Por tanto, por largo y complicado que fuese, *tuvo que incluirlo entre sus suposiciones.*

Así, durante 2000 años, ahí estuvo el postulado quinto, largo, desagradable, oscuro. Era como un fallo en la perfección, un constante reproche a una línea de razonamiento infinitamente monumental en lo demás. Sacaba de quicio a los matemáticos.

Y, de pronto, en 1733, un sacerdote italiano, Girolamo Saccheri, concibió respecto a este postulado la más brillante idea que había tenido nadie, desde tiempos de Euclides; pero no tuvo bastante valor para aprovecharla.

Vamos a contarlo en el capitulo siguiente.

17.La verdad plana

En ocasiones me resulta peligroso abstraerme en estos artículos que escribo. Por ejemplo, cierto día, un compañero de banquete, después de probar un plato, echó sal, tomó otro bocado y dijo satisfecho: "así está mucho mejor".

Yo, distraído, le dije: "Lo que usted quiere decir realmente es 'así me gusta mucho más'. Diciendo sencillamente 'así está mucho mejor' sienta usted la aventurada suposición de que un manjar puede saber objetivamente mejor; y además la suposición de que sus sensaciones subjetivas de gusto son una guía segura para la situación objetiva".

Creo que estuve a dos dedos de que me estrellasen en plena cara aquel plato tan perfectamente sazonado, y, en verdad, lo tenía bien merecido. Pero era que acababa de escribir el artículo anterior y estaba desbordante en el tema de las suposiciones.

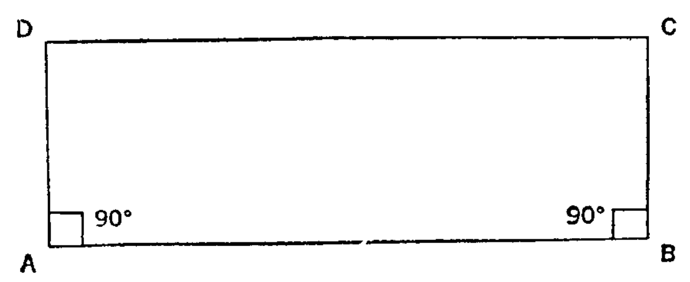
Volvamos ahora a este tema, a propósito del "quinto postulado de Euclides", que voy a repetir para que no tengan ustedes que andar buscándolo:

Si una recta corta a otras dos, formando por un mismo lado ángulos internos que sumen menos de dos rectos, esas dos rectas, prolongadas indefinidamente, se cortan por ese lado en que los ángulos suman menos de dos rectos.

Todos los demás axiomas de Euclides eran sumamente sencillos, pero él al parecer se dio cuenta de que este postulado quinto, en apariencia tan complicado, no podía deducirse de los restantes; y que, por tanto, había que incluirlo como nuevo axioma.

Hasta 2000 años después siguieron intentando otros geómetras demostrar que Euclides había desistido prematuramente y esforzándose en hallar alguna ingeniosa manera de deducir el postulado quinto, de los restantes axiomas, para poder así borrarlo de la lista, aunque sólo fuese por ser demasiado largo y complicado y demasiado falto de evidencia inmediata, para parecer un buen axioma.

Un modo de abordar el problema consistía en considerar el siguiente cuadrilátero:



Dos de sus ángulos, el DAB y el ABC, nos los dan como rectos y el lado AD es igual al BC. Sabido esto, y admitido el postulado quinto, es posible demostrar que el lado DC es igual al AB y que los ángulos ADC y DCB son también rectos, de modo que el cuadrilátero es precisamente un rectángulo.

Si no se admite dicho postulado, sino sólo los demás axiomas, lo más que puede lograrse es demostrar que los ángulos ADC y DCB son iguales, pero no que son precisamente rectos.

Surge ahora el problema de si será posible demostrar que dichos ángulos son rectos, partiendo de que son iguales. Si eso pudiese hacerse, del hecho de que el cuadrilátero ABCD es un rectángulo se deduciría que es cierto el postulado quinto. Eso se habría demostrado admitiendo sólo los demás axiomas, y ya no sería menester añadir a ellos el quinto.

Tal intento fue emprendido, ante todo, por los árabes medievales, que continuaron las tradiciones de la geometría griega, cuando la Europa occidental estaba sumida en tinieblas. El

primero que dibujó este cuadrilátero y caviló sobre sus ángulos rectos no fue otro que Omar Khayyam (1050-1123)[0].

Omar indicó que, si los ángulos ADC y DCB son iguales, hay tres posibilidades: 1.ª que ambos sean rectos; 2.ª que sean menores que un recto, o sea, agudos, y 3.ª que sean mayores u obtusos.

Encontró luego una línea de razonamiento que probaba que los casos de los ángulos agudos y obtusos eran absurdos, a base de admitir que dos rectas convergentes terminan por encontrarse.

Desde luego es de sentido común suponer que dos rectas convergentes tienen que cortarse, pero ocurre que, de sentido común o no, esa suposición equivale matemáticamente al postulado quinto. Ornar Khayyam terminaba, pues, por «demostrar» el postulado, suponiéndolo cierto, como una de las condiciones de la demostración. Eso se llama «un círculo vicioso» o «petición de principio»; pero sea cualquiera el nombre, no se permite en matemáticas.

Otro matemático árabe, Nasir Eddin al-Tus (1201-74) hizo un intento semejante, usando una suposición distinta y más complicada, para descartar en el cuadrilátero los ángulos agudos y obtusos. Más ¡ay!, esa suposición era también matemáticamente equivalente al postulado.

Llegamos así al italiano Girolamo Saccheri (1667-1733), a quien cité al final del capítulo anterior, el cual era profesor de matemáticas en la Universidad de Pisa y sacerdote jesuita.

Conocía la obra de Nasir Eddin y él también arremetió con el cuadrilátero; pero introduciendo algo completamente original, algo que en 2000 años a nadie se le había ocurrido hacer, con el postulado en cuestión.

Hasta entonces, unos lo habían omitido, a ver qué sucedía; otros habían hecho suposiciones que resultaron equivalentes a él. Saccheri lo que hizo fue empezar por suponer que *el postulado quinto es falso,* y sustituirlo por otro axioma contradictorio con él. Proyectaba entonces ir construyendo una geometría, basada en los demás axiomas de Euclides, más el «quinto cambiado», hasta llegar a una contradicción, probando por ejemplo que cierto teorema era a la vez *verdadero y falso.*

Alcanzada esa contradicción, habría que desechar el «quinto cambiado». Si se desechaban de ese modo todas las posibilidades de cambiar el quinto, dicho postulado tendría que ser cierto. Ese método de demostrar un teorema, probando que todas las restantes alternativas son absurdas, es una técnica matemática perfectamente aceptable[0] y Saccheri estaba en buen camino.

Practicando este método, Saccheri empezó por suponer que los ángulos ADC y DCB son ambos mayores que un recto. Sobre esa suposición, más *los restantes* axiomas de Euclides, emprendió su camino por lo que podríamos llamar la «geometría obtusa». Pronto tropezó con una contradicción; eso significaba que la «geometría obtusa» no podía ser cierta y que los ángulos ADC y DCB no podían ser mayores que un recto.

Tan importante es ese éxito, que el cuadrilátero introducido por Ornar Khayyam, para estudiar el postulado quinto de Euclides, hoy se llama «cuadrilátero de Saccheri».

Sumamente alentado por esto, Saccheri la emprendió con la «geometría aguda», que parte de suponer que los ángulos ADC y DCB son ambos agudos. Debió de empezar su tarea

[0] Escribió ingeniosos cuartetos, que Edward Fitzgerald tradujo aún más ingeniosamente al inglés en 1859, haciendo célebre para siempre a Omar, como poeta hedonístico y agnóstico; pero la verdad es que merece ser recordado como gran matemático y astrónomo.

[0] Eso equivale a la famosa frase de Sherlock Holmes, de que cuando se ha descartado lo imposible, lo que queda, por improbable que parezca, tiene que ser cierto.

animadísimo, seguro de que hallaría enseguida una contradicción, como en la «geometría obtusa».

En ese caso, quedaría demostrado el «quinto de Euclides», y su «geometría rectangular» ya no necesitaría como axioma ese enunciado tan desagradablemente largo.

Al ir estableciendo Saccheri proposición tras proposición de su «geometría aguda», su confianza fue cediendo terreno a la inquietud, porque no llegaba a ninguna contradicción. Iba enfrentándose cada vez más con la posibilidad de que pudiese edificarse una geometría, por completo consecuente en sí misma, basada en por lo menos un axioma que contradecía de lleno un postulado de Euclides. El resultado sería una «geometría no euclidiana», que podría parecer ir contra el sentido común, pero que por ser en sí autoconsistente, tiene validez matemática.

Por un momento, Saccheri se asomó al borde de la inmortalidad matemática, pero se volvió atrás.

No se atrevió; admitir la idea de una geometría no euclidiana exigía demasiado valor. Tan equivocadamente habían llegado los hombres cultos a confundir la geometría euclidiana con la verdad absoluta, que cualquier refutación de Euclides hubiese suscitado los más profundos sentimientos de inquietud en los corazones y las mentes de los intelectuales europeos. Dudar de Euclides era dudar de la verdad absoluta; si no había verdad absoluta en Euclides ¿no se deduciría fácilmente que no la hay en ninguna parte? Y puesto que las mayores pretensiones de verdad absoluta las reivindica la religión, ¿no se interpretaría un ataque a Euclides como un ataque a Dios?

Era evidentemente Saccheri un matemático de gran empuje, pero era, al mismo tiempo, un jesuita y un ser humano, y así le faltó valor y cometió la gran deserción [0].

Cuando en su gradual desarrollo de la geometría aguda llegó a un punto en que no podía aguantar más, se autosugestionó hasta imaginar que había encontrado una contradicción, donde en realidad no la había; y con inmenso alivio, concluyó que había probado «el quinto de Euclides». En 1733 publicó un libro con su descubrimiento, titulado «Euclides absuelto de todo fallo» y aquel mismo año falleció.

Por su deserción, Saccheri había perdido la inmortalidad, eligiendo el olvido. Su libro quedó virtualmente ignorado, hasta que llamó la atención sobre él el matemático italiano Eugenio Beltrami (1835-1900), cuando ya el fallo de Saccheri había sido enmendado por otros.

Ahora lo que sabemos de Saccheri es sólo esto: que tocó con su mano un descubrimiento matemático capital, un siglo antes que nadie y que le faltaron arrestos para asirlo firmemente.

Avancemos como un siglo, hasta el matemático alemán Carlos Federico Gauss (1777-18.55). Es fácil acreditar que Gauss es el más grande matemático que hubo nunca. Desde joven asombraba a Europa y al mundo científico con su talento.

Hacia 1815 estudió el quinto de Euclides, llegando a la misma consecuencia que él: que «el quinto» había que postularlo como axioma, porque no podía deducirse de los demás axiomas. Gauss llegó también a la conclusión ante la cual había retrocedido Saccheri: que hay otras geometrías autoconsistentes, que no son euclidianas, en las cuales un «axioma cambiado» sustituye al quinto.

Pero luego le faltaron también arrestos para publicar y en eso le niego mi simpatía. Su situación era diferente; Gauss tenía infinitamente más prestigio que Saccheri; no era sacerdote; vivía en un país y en una época en que el poder de la Iglesia no era temible. Gauss, genio y todo, fue un completo cobarde.

---

[0] No estoy censurándole. En su caso yo hubiese hecho indudablemente lo mismo. Digo sólo *que* fue mucha lástima.

Esto nos lleva al matemático ruso Nicolai Ivanovich Lobachevski (1793-1856) [0]. En 1826 Lobachevski empezó también a cavilar si una geometría podría ser no euclidiana y, sin embargo, consistente. Con esta idea desarrolló los teoremas de la «geometría aguda», como Saccheri un siglo antes; pero en 1829 Lobachevski hizo lo que ni Saccheri ni Gauss habían hecho. No *se echó atrás y publicó.* Desgraciadamente lo que publicó fue un artículo en ruso, titulado «Sobre los principios de la Geometría», en una revista local. (El trabajaba en la Universidad de Kazan, en el corazón de la Rusia provinciana.)

Más ¿quién lee el ruso? Lobachevski permaneció desconocido largo tiempo. Hasta que en 1840 publicó su trabajo en alemán; no llamó la atención del mundo de los matemáticos en general.

Pero, mientras tanto, un matemático húngaro, János Bolyai (1802-1860), estaba haciendo casi lo mismo. Bolyai es una de las figuras más novelescas de la historia de las matemáticas, pues se especializaba también en cosas como el violín y la esgrima —en la genuina tradición de un aristócrata húngaro—. Se cuenta que una *vez* se batió, uno tras otro, con trece esgrimidores, tocando el violín entre asalto y asalto, y que a todos los venció.

En 1831, el padre de Bolyai publicó un libro de matemáticas. Bolyai hijo había meditado varios años sobre el quinto de Euclides y convenció a su padre de que añadiese un apéndice de 26 páginas, exponiendo los principios de la «geometría aguda». Era eso dos años después de publicar su obra Lobachevski, pero por entonces nadie había oído hablar de aquel ruso, y hoy Lobachevski y Bolyai comparten generalmente el honor de haber descubierto la geometría no euclidiana.

Como Bolyai publicó en alemán, Gauss se enteró enseguida. Su recomendación le hubiese sido muy valiosa al joven Bolyai; pero Gauss no se atrevió aún a darle impresa su aprobación, si bien elogió de palabra la obra de Bolyai; y entonces no pudo resistirse: le dijo a Bolyai que había tenido las mismas ideas años antes, pero que no las había publicado, y le mostró la obra.

No tenía por qué haberlo hecho. Su reputación era inconmovible, aun sin la geometría no euclidiana. Había hecho más que una docena de matemáticos juntos.

Ya que no había tenido el valor de publicar, debió tener la decencia de dejarle el mérito a Bolyai; pero no lo hizo. Genio y todo, Gauss era ruin en algunas cosas.

Y ¿qué hay de la geometría obtusa? Saccheri, al estudiarla, la halló incursa en contradicción, por lo que fue desechada. Sin embargo, una vez establecida la validez de la geometría euclidiana, ¿no habría modo de rehabilitar también la geometría obtusa?

Sí que lo hay, pero sólo a costa de romper con Euclides, más radicalmente aún. Saccheri, al investigar la geometría obtusa, había hecho una suposición tácita, usada también por el mismo Euclides: que una recta podía tener longitud infinita. Suponer eso no introducía contradicción en la geometría aguda, ni en la rectangular o de Euclides; pero originaba conflictos en la obtusa.

Pues desechémosla también, entonces. Supongamos que, prescindiendo del «sentido común», admitimos que toda recta ha de tener cierta longitud máxima. En ese caso desaparece toda contradicción con la geometría obtusa y surge una segunda variedad de geometría no euclidiana válida. El primero en demostrarlo fue (1854) el matemático alemán Jorge F. Riemann (1826-1866).

Tenemos, pues, tres tipos de geometría que podemos distinguir formulando enunciados equivalentes a la versión del postulado quinto de que parten:

---

[0] Nicolai Ivanovich Lobachevski es mencionado en una de las canciones satíricas de Tom Lehrer; y un entusiasta de Lehrer, como yo mismo, encuentra extraño que citase a una persona tan seria; pero Lehrer era matemático de profesión y echó mano de un nombre real.

A) Geometría aguda (no euclidiana): Por un punto exterior a una recta se pueden trazar infinitas paralelas a ella.

B) Geometría rectangular (euclidiana): Por un punto exterior a una recta se puede trazar una y sólo una paralela a ella.

C) Geometría obtusa (no euclidiana): Por un punto exterior a una recta no se pueden trazar paralelas a ella.

Cabe también distinguirlas de otro modo equivalente:

A) Geometría aguda (no euclidiana): La suma de los ángulos de todo triángulo vale menos de 180°.

B) Geometría rectangular (euclidiana): La suma de los ángulos de todo triángulo vale exactamente 180°.

C) Geometría obtusa (no euclidiana): La suma de los ángulos de todo triángulo vale más de 180°.

Y preguntaréis ahora: ¿pero cuál de las tres es *verdadera?*

Si definimos verdadera como autoconsistente, las tres geometrías son verdaderas por igual.

Claro que son inconsistentes unas con otras y acaso corresponda una sola a la realidad. Podemos, pues, preguntarnos: ¿Cuál geometría corresponde a las realidades del universo real?

La respuesta es, de nuevo, que todas.

Consideremos, por ejemplo, el problema de viajar del punto A al B, ambos en la superficie terrestre; y supongamos que queremos ir de A a B recorriendo la menor distancia posible.

Para simplificar los resultados, supondremos dos cosas: 1.° que la Tierra es una esfera perfectamente lisa.

Eso es casi cierto en realidad, pues podemos eliminar, sin demasiado error, montañas y valles y hasta el abultamiento ecuatorial.

2.° Supongamos que tenemos que hacer el viaje por la superficie de esa esfera, y no podemos, por ejemplo, excavar en sus profundidades.

Para determinar la distancia más corta entre A y B por la superficie de la Tierra, podríamos tender una cuerda de un punto al otro y ponerla tirante. Si hiciésemos eso entre dos puntos de un plano, es decir, en una superficie como la de un encerado liso, extendiéndose infinitamente en todas direcciones, nos resultaría lo que solemos llamar una «línea recta».

Pero en la superficie de una esfera obtenemos una curva; y sin embargo esa curva es lo análogo a una línea recta, ya que esa curva es la menor distancia entre dos puntos en la superficie esférica. Resulta difícil forzarnos a admitir una curva como cosa análoga a una recta, porque las rectas las hemos pensado *derechas* siempre. Usemos, pues, otra palabra. A la línea más corta entre dos puntos en una superficie dada llamémosla «geodésica» [0].

En un plano, una geodésica es una línea recta; en una esfera las geodésicas son curvas, y precisamente arcos de «círculo máximo». Los círculos máximos tienen por radio el de la esfera y están en planos que pasan por el centro de ésta. En la Tierra, un ejemplo de círculo máximo es el ecuador, o cualquiera de los meridianos. En toda superficie esférica pueden trazarse infinitos círculos máximos. Si tomamos en ella pares cualesquiera de puntos, y los unimos por un hilo tirante, obtendremos arcos de diferentes círculos máximos.

Es visible que en una superficie esférica no existen geodésicas de longitud infinita. Al prolongarlas, lo que hacen es cerrarse sobre sí mismas, alrededor de la esfera.

---

[0] *Geodésica* deriva de voces griegas que significan «dividir la tierra», porque en la superficie terrestre toda geodésica, prolongada todo lo posible, divide dicha superficie en dos partes iguales.

En la superficie terrestre una geodésica no puede pasar de 40.000 kilómetros.

Además, en una esfera, cada dos geodésicas, prolongadas suficientemente, se cortan en dos puntos. En la superficie terrestre, por ejemplo, dos meridianos se cortan en el polo Norte y en el polo Sur. Eso prueba que en una superficie esférica, por un punto exterior a una geodésica dada, no se puede trazar ninguna paralela a dicha geodésica.

Además, si en una superficie esférica trazamos un triángulo cuyos lados sean arcos de círculo máximo, sus ángulos sumarán más de 180°. Quien tenga un «globo terráqueo» imagínese un triángulo con un vértice en el polo Norte, otro en el ecuador a 10° de longitud Oeste, y el tercero en el ecuador, a 100° de longitud Oeste. Encontrará que el triángulo es equilátero, con sus ángulos de 90°; la suma de los tres vale 270°.

Esta es precisamente la geometría desarrollada por Riemann, si las geodésicas se consideran como lo análogo a las líneas rectas. Es una geometría de rectas finitas, sin paralelas y con triángulos cuyos ángulos suman más de 180°. Lo que veníamos llamando geometría obtusa podría llamarse también «geometría esférica». Y lo que veníamos llamando geometría rectangular o euclidiana podría también llamarse «geometría plana».

En 1865 Eugenio Beltrami llamó la atención sobre una figura llamada «pseudosfera», parecida a dos clarinetes unidos por sus partes anchas y extendiéndose y estrechándose cada uno en un sentido, pero sin cerrarse del todo. En la superficie de una pseudosfera la geometría cumple los requisitos de la geometría aguda; en efecto, en esa superficie es posible trazar dos geodésicas que se corten, sin cortar, sin embargo, ninguna de las dos a una tercera geodésica exterior a ambas[0]. Es más, como entre las dos geodésicas que se cortan cabe trazar infinitas otras, cortándose todas en el mismo punto, por cada punto exterior a una geodésica se podrán trazar infinitas geodésicas paralelas a ella.

En otras palabras, la «geometría aguda» puede considerarse como «geometría pseudosférica».

Mas ahora, visto que las tres geometrías son igualmente válidas, en condiciones adecuadas a cada una, ¿cuál da mejor descripción del Universo en conjunto?

Eso no siempre es fácil de decir. Si un triángulo de geodésicas de longitud dada lo trazamos primero en una esfera pequeña y luego en una grande, la suma de sus ángulos pasará en ambos casos de 180°, pero el exceso será mayor en el caso de la esfera pequeña.

Si imaginamos un triángulo de magnitud fija, en una superficie esférica que crece cada vez más, la suma de los ángulos se acerca más y más a 180° y al fin, ni las medidas más precisas apreciarán la diferencia. En suma, una parte pequeña de una esfera muy grande es casi tan llana como un plano y se hace imposible distinguirlos.

Eso pasa, por ejemplo, con la Tierra. Precisamente por ser una esfera tan grande, es por lo que las partes pequeñas de ella parecen planas y por lo que le costó tanto tiempo a la humanidad convencerse de que era esférica, a pesar de parecer plana.

Pues bien, hay un problema análogo, relativo al Universo en general. La luz va de unos puntos a otros del espacio, del Sol a la Tierra o de una lejana galaxia a otra, salvando distancias inmensamente mayores que las posibles en la superficie terrestre.

Nosotros suponemos que la luz, al atravesar *pársecs,* marcha en línea recta; pero está claro que en realidad sigue una geodésica, que podrá ser recta o no. Si el Universo obedece a la geometría euclidiana, la geodésica será recta. Si obedece a una geometría no euclidiana, las geodésicas serán curvas, de una u otra clase.

A Gauss se le ocurrió formar triángulos de rayos de luz, que cruzaban el espacio entre tres cimas de montaña, y medir la suma de los ángulos resultantes. Desde luego los ángulos

---

[0] Eso parece absurdo porque estamos habituados a pensar según patrones planos, en que las geodésicas son rectas y en que dos rectas que se cortan no pueden ser ambas paralelas a otra recta. En una pseudoesfera las geodésicas se curvan de tal suerte que hacen posibles las dos paralelas.

sumaban alrededor de 180º, pero ¿los valían exactamente? Era imposible saberlo. Si el Universo fuese una esfera de millones de años luz de diámetro, y si los rayos de luz siguiesen las curvas de la esfera, no sería posible hoy apreciar, por medidas directas, el insignificante exceso de esas sumas sobre 180º.

Sin embargo, en 1916 Einstein construyó la teoría general de la relatividad y halló que, para explicar los efectos de la gravitación, tenía que admitir un Universo en el cual la luz –y todo lo demás- seguía geodésicas no euclidianas.

Según la teoría de Einstein, el Universo no es euclidiano y constituye un caso de «geometría obtusa».

En suma, que la geometría euclidiana, lejos de ser la verdad absoluta y eterna como se supuso durante 2000 años, es sólo la geometría sumamente restringida y abstracta del plano; y sólo proporciona una aproximación a geometrías tan importantes como la del Universo y la de nuestra superficie terrestre.

No es la *verdad* «*plena*», como tantos juzgaron seguro; sino sólo la verdad «*plana*»[0].

---

[0] No me neguéis que es ingenioso el chiste.

18.Morir en el laboratorio

Yo soy un gran iconoclasta. A poca ocasión que tenga, me gusta decir cosas disolventes de alguna venerada institución, y hablar con cínico sarcasmo del «día de la Madre», del pastel de manzana o del béisbol. Claro que, eso sí, no consiento que nadie vitupere a las instituciones que yo personalmente respeto.

Como la Ciencia y los Científicos (con C mayúscula, fijaos).

Los científicos tienen sus defectos, claro. Pueden ser pesados y dominantes, y clavar las teorías donde las encuentran, sin permitir desalojarlas. Ahí está, por ejemplo, el triste caso del químico francés Augusto Laurent y el químico sueco Juan Jacobo Berzelius.

En 1836 Laurent expuso teorías sobre la estructura de los compuestos orgánicos, que estaban bien orientadas; mientras que Berzelius llevaba ya años sosteniendo, sobre lo mismo, ideas que tenían importantes elementos de error. Desgraciadamente, Laurent era joven y poco conocido, y Berzelius, en su época, fue el gran hombre de la química; así que Laurent fue reducido a la oscuridad. Se vio forzado a trabajar en laboratorios de tercera clase, mal calentados, ya que ningún instituto importante quería emplearle, afrontando el desagrado de Berzelius. Esas condiciones míseras de trabajo agravaron su tuberculosis y le acarrearon una muerte prematura. En cambio, Berzelius murió en la cumbre de su fama; y sólo después de su desaparición empezaron a prosperar las ideas de Laurent.

Esas cosas suceden, ¡ay!, pero me complazco en creer que en la ciencia son menos frecuentes que en cualquier otro género de actividades humanas.

De todos modos, si alguien quiere zaherir a la ciencia como una organización en que la Autoridad ahoga las iniciativas, y en que viejos vanidosos aplastan a jóvenes genios, y en que la falta de un título de Licenciado condena a la absoluta oscuridad a aficionados brillantes, será conveniente disponer de algunos ejemplos genuinos.

A veces algunos citan el descubrimiento del fluoruro de xenón como ejemplo del modo en que teorías rutinarias inhiben completamente la experimentación.

Parece que estoy oyéndoles decir: «A unos químicos estúpidos y perezosos se les metió en la cabeza que los gases nobles no forman compuestos, así que nadie se preocupó de comprobar por experimentos si los forman o no. Al cabo, si todos saben que una cosa es imposible, ¡buena gana de intentarla! Y, sin embargo, si en cualquier momento algún químico se hubiese sencillamente molestado en mezclar xenón con flúor en un recipiente de níquel...»

Sí que parece gran estupidez de los químicos no caer en cosa tan fácil, ¿verdad? Con sólo mezclar xenón y flúor en recipiente de níquel, admirar al mundo y ganarse acaso un premio Nóbel.

Pero ¿sabéis lo que hubiese conseguido un químico normal, si hubiese intentado, en un laboratorio corriente, mezclar un poco de xenón (muy raro y carísimo, por cierto) con un poco de flúor? Muy probablemente producirse una intoxicación grave, y con suma facilidad morirse.

Si creéis que estoy exagerando, recordemos la historia del flúor. No empieza esa historia en el flúor mismo, asesino amarillento pálido, nunca visto por humanos ojos hasta hace ochenta años; sino en un extraño mineral utilizado por los mineros alemanes hace unos quinientos años.

Esa sustancia la menciona ya el primer gran mineralogista de los tiempos modernos, Jorge Agrícola. En 1529 describió su aplicación por los mineros alemanes. Ese mineral se funde fácilmente (para ser mineral) y mezclándolo con menas que haya que fundir, la mezcla funde con más facilidad, permitiendo un valioso ahorro de tiempo y combustible.

Lo líquido fluye y fluir se dice en latín *fluere;* por eso se llama *fluido* a cualquier sustancia que es líquida o gaseosa y fluye; de ahí derivamos también fluente, afluente, confluente, etc. La misma raíz tiene el nombre que aplicó Agrícola al mineral que se derretía y fluía tan fácilmente. Ese nombre era *flúores.*

Más tarde se llamó «espato de flúor», porque para los antiguos mineros «spar» significaba roca. Después, cuando se hizo costumbre añadir el sufijo «ita» a los nombres de los minerales, surgió la alternativa de llamarlo «fluorita». Cuando se descubrió que la fluorita expuesta a luz de cierta longitud de onda, emitía luz de onda más larga, se llamó «fluorescencia» a ese fenómeno.

Todavía hoy se emplea la fluorita como fundente en la fabricación del acero. Pasan los siglos, pero hay propiedades útiles que no pierden su utilidad.

En 1670 el vidriero alemán Enrique Schwandhard estaba trabajando con fluorita, sometiéndola, no importa por qué, a la acción de ácidos fuertes. Se desprendía un vapor y Schwandhard se inclinó a observarlo. Sus lentes se empañaron y probablemente él pensaría que el vapor se había condensado sobre ellos.

Pero la niebla no desapareció y un examen más cuidadoso mostró que las lentes estaban corroídas. En efecto, el cristal estaba disuelto en parte, y su lisa superficie aparecía rugosa.

Era aquello muy extraño, pues pocos reactivos atacan el cristal; por esa y otras ventajas lo prefieren tanto los químicos. Schwandhard sacó partido de esa corrosión.

Cubría de cera a trozos una superficie de vidrio para protegerlo del vapor, y éste corroía el resto. Así marcaba toda clase de delicadas figuras en el cristal transparente, sobre fondo deslustrado. Se hizo proteger por el emperador y prosperó en grande.

Pero mantuvo secreto su método y hasta 1725 no conocieron los químicos en general este interesante vapor.

Durante el siglo XVIII aparecieron informes ocasionales sobre la fluorita. Andrés Segismundo Margraf, químico alemán, demostró en 1768 que no contiene azufre.

Descubrió también que, tratada con ácidos, producía un vapor que abría verdaderos agujeros en sus instrumentos de cristal.

Pero fue un químico sueco, Carlos Guillermo Sebéele, quien realmente dio a conocer el gas taladra-vidrios hacia 1780. También él corroyó cristal acidificando fluorita. Estudió el vapor más concienzudamente que todos sus predecesores y sostuvo que el gas era un ácido. Por eso se le suele atribuir a Sebéele el descubrimiento del «ácido fluórico», como se le llamó por cerca de un cuarto de siglo.

Por desgracia, ese descubrimiento no benefició la salud de Sebéele. Había aislado gran número de sustancias y acostumbraba a oler y gustar cuantos nuevos cuerpos obtenía, para facilitar en parte su identificación rutinaria. Como además del «ácido fluórico» aisló cuerpos tan repulsivos como el gas sulfhídrico (el sumamente tóxico gas de los huevos podridos, que nos evoca los laboratorios químicos didácticos) y el ácido prúsico (usado en las cámaras de ejecución), lo extraño es que no pereciese al inhalar esos gases.

Más tampoco sobrevivió del todo, pues murió a la temprana edad de cuarenta y cuatro años, después de varios de invalidez. No hay duda, en mi opinión, de que su costumbre de olisquear y sorber cuerpos desconocidos abrevió considerablemente su vida.

Aunque la mayoría de los químicos son muy cautos para degustar, desde luego mucho más que el pobre Sebéele, para oler no lo son ni aun hoy mismo. Podrán no andar deliberadamente olisqueando cuerpos, pero el aire de los laboratorios suele estar cargado de gases y vapores, y los químicos acostumbran a tolerarlo con una especie de perverso placer, y reaccionan con cierta divertida superioridad profesional, cuando los profanos ponen caras arrugadas y dicen ¡uff!

Eso puede explicar la supuesta menor vida media de los químicos en general. Notad que no hablo de esa más breve vida, como de hecho establecido, pues ignoro si lo está: digo «supuesta». Pero hace poco vino una carta en una revista química, de uno que, fundándose en las noticias necrológicas, afirmaba que los químicos mueren mucho más jóvenes, por término medio, que los demás científicos. Y acaso así sea.

Hace algunos años se exteriorizaron sospechas de que numerosos químicos muestran, en su edad avanzada, aberraciones mentales, producidas insidiosamente, a la larga, por intoxicación mercurial; la cual sería debida a la constante presencia en el laboratorio de vapores mercuriales, procedentes de gotitas de mercurio ocultas en rincones y hendiduras. (Todos los químicos derraman mercurio algunas veces.)

Para evitar alarmas y desalientos, quiero, no obstante, hacer constar que algunos químicos vivieron vidas largas, en actividad [0]. Lleva la palma el químico francés Miguel Eugenio Chevreul, que nació en 1786 y falleció en 1889, a la gloriosa edad de ciento tres años. Es más, siguió trabajando hasta muy avanzada ancianidad; pues con más de noventa años estaba haciendo útiles estudios de gerontología (efectos de la vejez en los organismos vivos), sirviéndose de sí mismo (¿quién mejor?) como sujeto. Asistió a la solemne celebración del centenario de su nacimiento y fue ovacionado entusiásticamente como «Néstor de la Ciencia». Por cierto que no sé de ningún otro científico de primera clase, que haya llegado a centenario. Si algún amable lector sabe de otro, comuníquemelo, por favor.

Claro que Chevreul trabajó con sustancias nada peligrosas, como ceras, jabones, grasas, etc.; pero fijémonos ahora en el químico inglés Roberto Guillermo Bunsen.

De joven trabajó en compuestos orgánicos del arsénico y se intoxicó casi a punto de muerte. A los veinticinco años le explotó uno de esos compuestos y le hizo perder un ojo. Pero sobrevivió y llegó a alcanzar la respetable edad de ochenta y ocho años.

Pero es un hecho que muchos químicos del siglo posterior a Sebéele, que hicieron investigaciones importantes sobre el ácido fluorhídrico, murieron relativamente jóvenes.

En cuanto Sebéele hubo establecido que el gas que desprendía la fluorita acidificada era un ácido, surgió un error acerca de su estructura. El gran químico francés A. Laurent Lavoisier había decidido, precisamente por entonces, que todos los ácidos contenían oxígeno; como que la palabra oxígeno significaba en griego «productor de ácidos».

Verdad es que muchos ácidos contienen oxígeno (el sulfúrico y el nítrico, por ejemplo), pero otros no. Fijémonos, por ejemplo, en el compuesto llamado «ácido muriático» de la palabra latina que significa salmuera, porque se obtenía tratando la salmuera por ácido sulfúrico.

Se suponía, siguiendo el principio de Lavoisier, que el ácido muriático contenía oxígeno; que era quizá una combinación del oxígeno con un nuevo elemento aún desconocido, llamado «murio». Observó Sebéele que al tratar el ácido muriático con ciertos compuestos oxigenados se obtenía un gas verdoso. Supuso que el ácido muriático tomaba más oxígeno aún, y al gas lo llamó «ácido oximuriático».

Pero el químico inglés Humphry Davy, tras concienzudos estudios, consiguió demostrar que no contenía oxígeno. Más bien contendría hidrógeno; era probablemente un compuesto del hidrógeno con el elemento entonces desconocido. Además, al combinarse oxígeno con el ácido muriático, lo probable es que se combinase con el hidrógeno, llevándoselo y dejando aislado el elemento entonces desconocido. Tal elemento, decidió Davy, era el gas verdoso que había llamado Sebéele ácido oximuriático; y en 1810 él lo llamó cloro, de la palabra griega «verde», por su color.

---

[0] Para los leales lectores que puedan inquietarse por mi suerte, he de reconocer que llevo muchos años sin entrar en laboratorios, más que en raras ocasiones.

Como el ácido muriático es un compuesto de hidrógeno y cloro, recibió el nombre de «cloruro de hidrógeno», en forma gaseosa, o ácido clorhídrico, en solución acuosa.

Se vio que también otros ácidos carecían de oxígeno, el sulfhídrico y el cianhídrico, por ejemplo. Son ácidos muy débiles, desde luego, pero los acostumbrados a ácidos con oxígeno no podían incurrir ya en el error de creer que sin oxígeno no hay ácidos fuertes; pues el clorhídrico, que no contiene oxígeno, es un fuerte ácido.

Davy procedió a demostrar que el ácido «fluórico» es otro ejemplo de ácido sin oxígeno. Además dicho ácido tenía propiedades que recordaban mucho al cloruro de hidrógeno. Por eso el físico francés Andrés María Ampére imaginó que el ácido fluórico bien podía ser un compuesto del hidrógeno con un elemento muy parecido al cloro. Se lo dijo a Davy, que estuvo conforme.

En 1813 Ampére y Davy llamaron «flúor» al nuevo elemento, aún no aislado ni estudiado; ese nombre se deriva naturalmente de fluorita. Al ácido fluórico se le llamó «fluorhídrico» o «fluoruro de hidrógeno» y a la fluorita «fluoruro de calcio».

Surgió entonces el problema de aislar el flúor para poder estudiarlo. Tal problema resultó de suma dificultad.

El cloro podía obtenerse del ácido clorhídrico, haciendo, por decirlo así, que el oxígeno arrancase el hidrógeno de las garras del cloro, dejando éste aislado, en forma de elemento. El oxígeno, como veis, es más activo que el cloro y «tira más fuerte» del hidrógeno.

Pero ese procedimiento no dio resultado para aislar el flúor. El oxígeno no podía de ninguna manera arrancar el hidrógeno de sus garras. (Muchos años después se vio que, por el contrario, el elemento flúor podía arrebatarle el hidrógeno al oxígeno). Al reaccionar con agua, compuesta de oxígeno e hidrógeno, el flúor tira del hidrógeno con tal fuerza que deja libre el oxígeno, en la forma excepcionalmente enérgica de ozono.

Era ineludible la conclusión de que el flúor es más activo que el cloro y el oxígeno. Es más, había motivos para sospechar que el flúor podía ser el elemento más activo que existe, lo cual confirmaron ampliamente los químicos posteriores; y que ninguna simple reacción química podría aislarlo de compuestos como el fluoruro de hidrógeno o el de calcio, ya que ningún otro elemento podría arrancar el hidrógeno del fuerte puño del flúor.

Pero ¿quién dice que haya necesidad de limitarse a reacciones químicas? En 1800 se inventó la pila eléctrica y a las pocas semanas ya se había descubierto que una corriente eléctrica, al pasar por un compuesto, podía disgregarlo (electrólisis), aunque las reacciones químicas corrientes sólo pudieran efectuar esa descomposición en condiciones extremas. El agua, por ejemplo, se descomponía en hidrógeno y oxígeno; el hidrógeno, como muchos metales, puede hacerse aparecer en el electrodo negativo, mientras que el oxígeno, como otros no metales, puede hacerse aparecer en el positivo.

Davy aplicó esa técnica a varios compuestos, que, según los químicos aseguraban, contenían metales desconocidos aún, tan activos, que las técnicas químicas ordinarias no bastaban para liberarlos. En 1807 y 1808, haciendo uso de las más poderosas baterías eléctricas conocidas entonces, aisló rápidamente seis metales de extremada actividad: el potasio, sodio, calcio, magnesio, estroncio y bario. Claro que todos ellos aparecían en el electrodo negativo.

No había razón, pensaba Davy, para que esa misma técnica no descompusiese el fluoruro cálcico. El calcio debía aparecer en el electrodo negativo y el flúor en el positivo. Al intentarlo no consiguió su objeto. Sí que aislaría flúor en el electrodo positivo; pero en cuanto se depositaba atacaba cuanto había a su alcance: agua, vidrio, hasta los recipientes de plata y platino que usaba Davy.

En poquísimo tiempo lograba éste obtener compuestos de flúor, pero nunca flúor puro.

Estas tentativas produjeron también fiascos de otros géneros; pues Davy se atrapó en sus trabajos sobre compuestos de flúor un grave envenenamiento, por respirar pequeñas cantidades de ácido fluorhídrico. No le mató, pero contribuyó, sin duda, a que muriera de cincuenta años, y pasase incapacitado los últimos.

Peor suerte aún tuvieron otros. Por los años 1830, dos hermanos ingleses, Tomás y Jorge Knox, decidieron no considerar demostrado que era imposible aislar el flúor por medios químicos (no son tan rutinarios los científicos, como sus críticos gustan de suponer). Intentaron convencer al cloro de que atacase el mercurio del fluoruro mercúrico, dejando libre el flúor. Fracasaron, y ambos padecieron largos y angustiosos ataques de intoxicación por ácido fluorhídrico.

El químico belga P. Louyel, que seguía de cerca los intentos de los hermanos Knox, quiso repetir sus trabajos y fracasó más espectacularmente aún. Lo mató del todo el ácido fluorhídrico.

Uno de los ayudantes de Louyet fue el químico francés Edmundo Frémy. Había presenciado algunos de los experimentos de Louyet y comprendió que, empeñándose en aislar el flúor por reacciones químicas, sólo sacaba uno la entrada para «la Morgue». Volvió al método electrolítico de Davy y trabajó con la más escrupulosa cautela. En premio consiguió llegar a los ochenta años.

En 1885 repitió el intento de Davy, de electrolizar fluoruro cálcico, con idénticos resultados. Cuanto flúor quedaba libre, desaparecía inmediatamente, combinandose con cuanto topaba.

Decidió después trabajar con el mismo ácido fluorhídrico, que por licuarse a temperaturas poco inferiores a la del laboratorio, se maneja mejor que el fluoruro cálcico, que hay que mantenerlo al rojo durante la electrólisis.

Desgraciadamente, en tiempos de Frémy el ácido fluorhídrico se obtenía siempre en solución acuosa. Querer electrolizar una solución acuosa de ácido fluorhídrico significaba que en el electrodo positivo podían desprenderse dos elementos: oxígeno o flúor. Como el oxígeno era menos activo y más fácil de arrancar del hidrógeno, en ese electrodo sólo aparecía oxígeno, por poca agua que llevase el ácido fluorhídrico.

Por eso Frémy desarrolló métodos para obtener fluorhídrico completamente libre de agua o «anhidro»; fue el primero que lo obtuvo. Por desgracia, sus propósitos se frustraron: el ácido fluorhídrico anhidro no conduce la corriente eléctrica. Añadiendo un poco de agua, pasaba la corriente, pero sólo se desprendía oxígeno.

Al fin, también él desistió, y al comenzar los años ochenta seguía victorioso el flúor: Durante tres cuartos de siglo había resistido los mayores esfuerzos de muchos químicos de primera categoría, matando del todo a unos y dejando imposibilitados a otros.

Tenía Frémy un discípulo, el químico francés Fernando Federico Enrique Moissan, que prosiguió la batalla, atacando con tenacidad de buldog el problema del flúor.

Volvió una vez más a métodos químicos. Pensó que tenía que partir de un compuesto de flúor relativamente inestable; al cabo, cuanto más estable es un compuesto, más firme presa hace el flúor en los demás átomos y más difícil es dejar libre ese flúor.

En 1884 llegó Moissan a la conclusión de que el fluoruro de fósforo era relativamente inestable (para ser fluoruro). Eso parecía aún más favorable, por ser excepcional la avidez del fósforo por combinarse con el oxígeno. Quizá gracias a ello, pudiese el oxígeno arrancarle el fósforo al flúor. Moissan lo ensayó con éxito sólo parcial: El oxígeno hizo presa, en efecto, en el fósforo, pero el flúor tampoco lo soltó; en el compuesto obtenido por Moissan, el fósforo estaba combinado a la vez con oxígeno y con flúor.

Moissan emprendió otro plan. El platino es un metal en extremo inerte; hasta el flúor lo ataca con dificultad; pero en caliente, parece combinarse fácilmente con el fósforo. Haciendo

pasar fluoruro de fósforo sobre platino calentado ¿no se combinaría dicho metal con el fósforo mejor que con el flúor, dejando éste libre?

No hubo esa suerte. Fósforo y flúor se combinaron a la vez con el platino, y en pocos minutos quedó estropeada inútilmente cierta cantidad de ese metal tan caro.

(Por fortuna tenía Moissan un suegro rico, que le subvencionaba con generosidad.)

Como había hecho Frémy, Moissan decidió abandonar la química directa y ensayar la electrólisis.

Empezó con el fluoruro de arsénico y después de emplearlo sin éxito, decidió abandonar esa línea de investigación, porque estaba empezando a intoxicarse con el arsénico. Volvió, pues, al fluorhídrico, y padeció cuatro distintos ataques de envenenamiento por ese ácido, que al final contribuyeron a producirle la muerte, a la edad de cuarenta y cuatro años.

Recordaba muy bien Moissan que el ácido fluorhídrico anhidro de Frémy no conducía la corriente eléctrica.

Había que añadirle algo para hacerle conductor, pero algo que no ocasionase la producción de otro elemento en el electrodo positivo. ¿Por qué no otro fluoruro? Moissan disolvió fluoruro ácido de potasio en el ácido fluorhídrico anhidro y obtuvo una mezcla que conducía la corriente, y que sólo podía desprender flúor en el electrodo positivo.

Además utilizó un equipo fabricado de una aleación de platino e iridio, la cual era aún más resistente al flúor que el platino puro.

Finalmente puso todo su aparato a —50° C. Al bajar la temperatura, todas las reacciones químicas se entorpecen; y a —50° C, aun la agresividad del flúor debe quedar amansada.

Moissan dio paso a la corriente: En el electrodo negativo burbujeaba furiosamente el hidrógeno; pero en el positivo nada se veía. De detuvo a pensar. El electrodo positivo se insertaba en el vaso de platino-iridio por un tapón; como éste tenía que ser aislador, no podía ser de platino, ni de ningún otro metal; y ese tapón había sido atacado por el flúor. Era natural la falta de burbujas gaseosas.

Moissan necesitaba un tapón de una materia que no condujese la corriente, ni fuese atacada por el flúor. Se le ocurrió que el mineral fluorita tiene todo el flúor de que es capaz y no debe ser ya atacada. Labró, pues, cuidadosamente tapones de fluorita y repitió el experimento.

El 26 de junio de 1886 obtuvo un gas amarillo-verdoso pálido, alrededor de su electrodo positivo. ¡El flúor aislado al fin! Y la repetición del experimento la presenció su viejo profesor Frémy.

En 1899 Moissan pasó a elaborar un método menos caro para obtener flúor. Utilizó vasos de cobre. El flúor lo atacaba violentamente, pero cuando quedaba cubierto de fluoruro de cobre, ya no eran de temer más ataques.

En 1906, un año antes de morir, Moissan recibió el premio Nóbel de química por su hazaña.

Aún siguió siendo el flúor, durante otra generación, el niño malo de la tabla de los elementos. Era posible obtenerlo y usarlo, pero no con facilidad, ni con frecuencia. Sobre todo no puede ser manejado sin las más extremadas precauciones, porque es más venenoso aún que el ácido fluorhídrico.

Entre tanto, por los años noventa, se descubrieron los gases nobles, y aunque se reconoció que eran en extremo inertes, los químicos intentaron repetidas veces obligarles a formar alguna especie de compuestos. No creáis el mito de que había tanta seguridad de que eran incapaces de reaccionar, que nadie intentó nunca hacer la prueba.

Las revistas describían docenas y docenas de compuestos obtenidos; pero, hasta muy recientemente, tales obtenciones resultaban siempre ilusorias.

Hasta los primeros años treinta no estuvo lo bastante desarrollada la química teórica, para que no hubiera que manejar al azar los gases nobles, hasta conseguir formar compuestos. En 1933, el químico norteamericano Linus Pauling logró demostrar, por argumentos lógicos, que el xenón debía poder combinarse con el flúor. Casi inmediatamente dos químicos, discípulos suyos en el Instituto Tecnológico de California, aceptaron el desafío, a saber, Donald M. Yost y Alberto L. Kaye.

No pudieron proporcionarse más que 100 cm^3 de xenón, a la presión atmosférica, y de flúor no tenían nada.

Para prepararlo hubieron de valerse de un artificio de su invención, que funcionaba sólo con intermitencias.

Arreglándose lo mejor que pudieron, no fueron capaces de obtener señales claras de éxito, aunque tampoco estaban seguros del todo de que no se había formado ningún compuesto. Los resultados quedaban dudosos.

No tuvieron seguidores inmediatos. Los precedentes no eran animadores. Era conocida la «criminal» historia del flúor y a nadie entusiasmaba experimentar con él.

Durante la Segunda Guerra Mundial se necesitó flúor para investigaciones sobre la bomba atómica. Bajo tan poderosa coacción, se desarrollaron métodos para obtener flúor en cantidad, y con una seguridad aceptable.

En los años 50 se hizo al fin posible hacer experimentos no militares con flúor, sin gran riesgo de suicidio.

Pero aun entonces había pocos laboratorios equipados para tales tareas, y éstos tenían muchísimas cosas que hacer con el flúor, en vez de mezclarlo con gases nobles.

¿Conque «basta mezclar xenón con flúor en recipiente de níquel»? Eso no hubiese podido hacerse con razonable seguridad y esperanza de éxito hasta diez años antes de 1962, que es cuando se hizo realmente; y en aquellas circunstancias el retraso de diez años estaba justificado plenamente, y no arroja el menor descrédito sobre la ciencia.

FIN